

Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик

ФИЗИКА

11 УЧЕБНИК
класс



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МНЕМОЗИНА

Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик

ФИЗИКА

11

класс

В двух частях

Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений
(базовый уровень)

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*

3-е издание, стереотипное



Москва 2012

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Г34

На учебник получены положительные заключения
Российской академии наук (№ 10106–5215/517 от 24.10.2008)
и Российской академии образования (№ 01–5/7д–245 от 06.10.2008)

Генденштейн Л. Э.

Г34 Физика. 11 класс. В 2 ч. Ч. 1. Учебник для общеобразоват. учреждений (базовый уровень) / Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик. — 3-изд., стер. — М.: Мнемозина, 2012. — 272 с.: ил.

ISBN 978-5-346-02108-7

В учебнике изложены основы электродинамики, оптики, атомной физики и астрофизики. Четкая структура учебника облегчает понимание учебного материала. Приведено много примеров проявления и применения физических законов в окружающей жизни, сведений из истории физических открытий, дано иллюстрированное описание физических опытов. Приведены примеры решения ключевых задач.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Учебное издание

Генденштейн Лев Элевич, Дик Юрий Иванович

ФИЗИКА

11 класс

В двух частях

Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений
(базовый уровень)

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Школьная».
Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,0. Тираж 6900 экз. Заказ №328

Издательство «Мнемозина». 105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29 б.

Тел.: 8 (499) 367 5418, 367 5627, 367 6781; факс: 8 (499) 165 9218.

E-mail: ioc@mnemozina.ru www.mnemozina.ru

Магазин «Мнемозина»

(розничная и мелкооптовая продажа книг, «КНИГА — ПОЧТОЙ»,
ИНТЕРНЕТ-магазин).

105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29 б.

Тел./факс: 8 (495) 783 8284; тел.: 8 (495) 783 8285.

E-mail: magazin@mnemozina.ru www.shop.mnemozina.ru

Торговый дом «Мнемозина» (оптовая продажа книг).

Тел./факс: 8 (495) 665 6031 (многоканальный). E-mail: td@mnemozina.ru

Отпечатано в ООО «Финтрекс».

115477, Москва, ул. Кантемировская, 60.

© «Мнемозина», 2009

© «Мнемозина», 2012

© Оформление. «Мнемозина», 2012

Все права защищены

ISBN 978-5-346-02107-0 (общ.)

ISBN 978-5-346-02108-7 (ч. 1)

- Учебник предназначен для изучения физики в 11-м классе на базовом уровне. Исходя из этого *материал в учебнике изложен доступно*, при необходимости кратко повторяются сведения из курса физики основной школы.
- Авторы стремились представить физику как живую науку, являющуюся частью общей культуры. С этой целью приведено много *примеров* проявления и применения физических законов в окружающей жизни, сведений из истории физических *открытий*, дано иллюстрированное описание физических *опытов*.
- Изложение материала часто ведется в форме диалога: многие подпункты параграфов начинаются с *вопроса*, ответом на который служит содержание этого фрагмента.
- Вопросы и задания для самопроверки разделены в учебнике на два уровня сложности. Более сложные задания отмечены звездочкой.
- Учебник является ядром учебно-методического комплекта. Второй основной элемент комплекта — задачник, в котором содержатся задачи по всем темам курса, дифференцированные по уровням сложности. Задачник можно использовать для работы в классе и дома.
- В комплект также входят сборник самостоятельных работ, тематические контрольные работы, методические материалы, тетрадь для лабораторных работ и интерактивное приложение на компакт-диске.
- С помощью учебника, задачника и других компонентов комплекта учитель сможет подготовить учащихся к *ЕГЭ по физике*. Для этого целесообразно дополнительно выделить один час в неделю (за счет школьного компонента).

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге рассказано о физических открытиях 19-го и 20-го веков. Они изменили ход истории и представление человека о мире.

Изучение электромагнитных явлений проложило дорогу широкому применению электричества в 20-м столетии, которое стали называть «веком электричества» и «веком радио».

Однако в дальнейшем благодаря новым открытиям — и снова в физике — у 20-го столетия появились и новые названия. Развитие представлений о пространстве и времени, о частицах и волнах, о материи и поле сделало его «веком атома», а затем «веком космоса» и «веком информации». Покорение атома открыло человеку новые источники энергии.

Выяснилось также, что во Вселенной нет ничего вечного и неизменного — не вечна даже сама Вселенная! Казавшиеся неизменными звезды на самом деле рождаются и взрываются.

Самое же удивительное состоит, наверное, в том, что именно при взрывах звезд и родились те атомы, из которых состоим мы с вами!

Обо всем этом вы сможете прочитать на страницах этого учебника.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 1

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Широкое применение электричества стало возможным благодаря использованию электрического тока: с его помощью освещают улицы и квартиры, обогревают помещения, ток приводит в движение поезда электричек и метро, миллионы станков.

В этой главе мы рассмотрим основные законы постоянного тока: законы Ома для участка цепи и для полной цепи, а также закон Джоуля — Ленца. Мы рассмотрим также параллельное и последовательное соединение проводников и найдем, как перераспределяются между проводниками сила тока, напряжение и выделяемая мощность.

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1. Источники постоянного тока
2. Сила тока
3. Действия электрического тока

Мы расскажем здесь об изобретении источника электрического тока и рассмотрим основные действия тока: тепловое, магнитное и химическое.

1. ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

До конца 18-го века «получать электричество», то есть заряжать тела, разделяя электрические заряды, умели только посредством трения.

Поэтому ученые изучали в основном взаимодействие заряженных тел и электрические разряды. При этом, как вы уже знаете, были сделаны важные открытия: установлено существование двух типов электрических зарядов, открыт закон взаимодействия точечных зарядов (закон Кулона), обнаружено родство электрических разрядов с молнией.

Однако практического применения этим открытиям найти не удавалось, и поэтому их использовали в основном для эффектных демонстраций и развлечений.

Например, один ученый монах пропускал электрический разряд через длинную цепь взявшихся за руки придворных французского короля, и нарядные дамы вместе с блестящими кавалерами, к радости короля, одновременно взвизгивали и подпрыгивали.

Крутой поворот в «судьбе» электричества произошел благодаря открытию итальянского ученого Алессандро Вольта, которое он сделал в самом конце 18-го века.

ОТКРЫТИЕ ВОЛЬТА

Вольта обнаружил, что между медным и цинковым проводниками, погруженными в раствор поваренной соли, возникает постоянная разность потенциалов.

Электроизмерительных приборов тогда еще не было, и наличие разности потенциалов ученый определял «на язык»: касаясь языком обоих проводников, он ощущал кисловатый привкус, знакомый сегодня каждому, кто пробовал лизнуть полюса батарейки для карманного фонарика.

Чтобы увеличить разность потенциалов, Вольта сложил столбиком попеременно несколько десятков медных и цинковых кружков, переложив их картонными, пропитанными соленой водой. И когда он прикоснулся одной рукой к верхнему медному кружку,

а другой — к нижнему цинковому, он испытал ощутимый электрический удар. Причем удар повторялся *снова и снова* — при *каждом* прикосновении к кружкам. Это означало, что разделение электрических зарядов в «вольтовом столбе», как окрестили впоследствии прибор Вольта, происходило *непрерывно*. И ученый догадался, что с помощью созданного им прибора можно получать постоянный электрический ток.

Так был изобретен *источник постоянного тока*.

Это изобретение произвело большое впечатление — и не только на ученых: Вольта стал настолько знаменит, что сам Наполеон пригласил ученого, чтобы тот продемонстрировал ему удивительные свойства созданного им прибора.

Многие ученые сразу же начали использовать «вольтов столб» для изучения свойств электрического тока и производимых им действий.

И уже в первые десятилетия 19-го века были сделаны открытия, благодаря которым стало возможным широкое применение электричества.

2. СИЛА ТОКА

Если через поперечное сечение проводника за любые равные промежутки времени проходят равные заряды, говорят, что по этому проводнику течет *постоянный ток*.

Такое название обусловлено тем, что в этом случае отношение заряда к промежутку времени, в течение которого был перенесен заряд, остается постоянным.

Физическую величину, равную отношению заряда q , перенесенного через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , к этому промежутку времени, называют силой тока¹: $I = \frac{q}{t}$.

В системе СИ силу тока измеряют в амперах (А). Ампер является одной из основных единиц системы СИ и определяется с помощью магнитного взаимодействия токов (см. § 6. *Взаимодействие магнитов и токов*).

Велик ли ток силой 1 ампер?

Из курса физики 10-го класса вы уже знаете, что заряд 1 Кл очень велик. Поэтому можно предположить, что если по проводнику течет ток силой 1 А, то есть если через поперечное сечение

¹ Это не совсем удачное название, поскольку сила тока — вовсе не «сила» в ее механическом понимании; однако это название настолько «прижилось» в науке и технике, что его пока не решаются изменять.

проводника ежесекундно проходит заряд 1 Кл, то это должен быть очень большой ток.

Однако это не так. Сила тока 1 А является весьма заурядной в электротехнике: например, сила тока в настольной лампе составляет несколько десятых долей ампера, а сила тока в электрическом чайнике — почти 10 А.

Для человека смертельно опасной может оказаться сила тока всего 0,05 А. Поэтому будьте осторожны с электричеством!

КАКОВА СКОРОСТЬ НАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ?

Когда замыкают электрическую цепь, электрический ток возникает практически сразу во всей цепи: свободные заряды приводят в движение электрическое поле, распространяющееся вдоль проводов со скоростью света, то есть примерно 300 000 км/с.

Скорость же направленного движения электронов очень мала: так, расчеты показывают, что, когда в проводе сечением 1 мм² сила тока равна 1 А, скорость *направленного* движения электронов меньше 0,1 мм/с. Улитка и та ползет быстрее!

Подчеркнем, однако, что речь идет о скорости *направленного* движения электронов, обусловленного действием электрического поля в проводнике. Скорость же хаотического движения электронов огромна — она составляет десятки тысяч километров в секунду.

3. ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Если опустить в раствор медного купороса угольные электроды и пропускать через этот раствор постоянный электрический ток, то уже через несколько минут на отрицательном электроде появится медный налет. Это говорит о том, что положительно заряженные ионы меди, содержащиеся в растворе медного купороса, под действием электрического тока движутся к отрицательному электроду и осаждаются на нем.

Сходные процессы происходят и при пропускании тока через другие растворы или расплавы солей, кислот и щелочей, в которых в результате диссоциации (распада) молекул образуются *ионы*. Такие жидкости называют *электролитами*¹. При прохождении тока через электролит положительно и отрицательно заряженные ионы движутся к различным электродам и осаждаются на них либо выделяются в виде пузырьков газа. Это явление называют *электро-*

¹ От «электро» (относящийся к электричеству) и «литос» (в переводе с греческого — разложимый).

лизом. Оно получило широкое применение: например, с помощью электролиза никелируют и хромируют изделия, а также получают некоторые металлы (в частности, алюминий).

Законы электролиза установил на опыте в начале 19-го века английский ученый Майкл Фарадей.

ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Сразу же после появления первых источников тока ученые заметили, что при прохождении тока проводник нагревается и даже может раскалиться добела, то есть стать источником света. А поскольку в те времена города по ночам погружались в глубокий мрак (электричества-то не было!), тепловое действие тока решили использовать прежде всего для создания мощных источников света.

Уже через два года после появления «вольтова столба» российский ученый В. В. Петров, собрав «вольтов столб» из нескольких тысяч медных и цинковых кружков, обнаружил, что если пропускать большой ток через угольные электроды, они в месте контакта раскаляются добела, а при раздвигании между ними возникает ослепительно яркая дуга раскаленного газа, которую назвали «электрической дугой». Российский электротехник П. Н. Яблочков первым применил электрическую дугу для освещения.

Первую лампу накаливания сделал российский электротехник А. Н. Лодыгин. Лампочками Лодыгина была освещена одна из улиц Петербурга. Значительные усовершенствования в лампе накаливания, приблизившие ее к современному виду, сделал американский изобретатель Томас Эдисон.

В первой половине 19-го века российский ученый Э. Х. Ленц и английский ученый Дж. Джоуль независимо друг от друга установили на опыте количественный закон теплового действия тока (закон Джоуля — Ленца). Мы рассмотрим его в § 4. *Работа и мощность постоянного тока.*

МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

В 1820 году датский ученый Ханс Кристиан Эрстед обнаружил, что вблизи проводника с током магнитная стрелка поворачивается, ориентируясь перпендикулярно проводнику. Вскоре после этого французский ученый Андре Мари Ампер открыл, что проводники с током также взаимодействуют друг с другом.

Дальнейшие исследования показали, что взаимодействие проводников, по которым текут токи, осуществляется посредством *магнитного поля*, которое создается движущимися зарядами и действует тоже на движущиеся заряды.

Магнитное действие тока сыграло огромную роль в распространении электричества: чуть заметное движение магнитной стрелки явилось предвестником изобретения электродвигателя.

Магнитное действие тока замечательно тем, что оно проявляется *всегда* (химическое действие тока отсутствует при прохождении тока через металлы, а тепловое — при прохождении тока через сверхпроводники). Поэтому магнитное действие тока используют для измерения силы тока.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Кто изобрел источник постоянного тока?
2. Что такое сила тока? Как называют единицу силы тока?
3. Скорость направленного движения электронов при наличии тока в проводнике меньше 1 мм/с. Почему же тогда лампа включается сразу после того, как вы нажимаете на кнопку выключателя?
4. Всегда ли направление электрического тока совпадает с направлением движения носителей заряда? Проиллюстрируйте ваш ответ примерами.
5. Двигутся ли заряженные частицы в проводнике, по которому не идет ток? Если да, то как изменятся движение заряженных частиц в проводнике, когда по нему начинает идти ток?
6. Приведите примеры химического действия тока. Как используют это действие тока?
7. Приведите примеры теплового действия тока. Как используют это действие тока?
8. Приведите примеры магнитного действия тока. Почему именно это действие тока используют для измерения силы тока?
- 9*. Какие действия тока можно наблюдать, пропуская ток через морскую воду?
- 10*. Трамвайная линия, в отличие от троллейбусной, имеет только один электрический провод. Как в этом случае создается замкнутая цепь?
- 11*. Турист обнаружил в овраге провод, оба конца которого уходят в землю. Как определить, идет ли по этому проводу ток, не прикасаясь к проводу?

§ 2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

1. Сопротивление и закон Ома для участка цепи
2. Природа электрического сопротивления
3. Сверхпроводимость

Закон Ома связывает силу тока в проводнике с напряжением на концах этого проводника.

Мы рассмотрим природу электрического сопротивления в разных проводниках и расскажем о сверхпроводимости — удивительном явлении, когда электрическое сопротивление становится равным нулю.

1. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

В начале 19-го века немецкий физик Георг Ом установил на опыте соотношение между напряжением U на концах металлического проводника и силой тока I в этом проводнике.



Георг Ом (1787—1854)

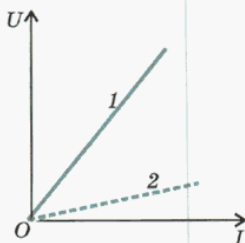


Рис. 2.1. Зависимость напряжения на концах металлического проводника от силы тока (для двух проводников)

На рис. 2.1 показаны полученные на опыте графики зависимости $U(I)$ для двух различных металлических проводников *при неизменной температуре*.

Мы видим, что для металлических проводников напряжение U на концах проводника прямо пропорционально силе тока I в проводнике.

Значит, отношение $R = \frac{U}{I}$ не зависит ни от напряжения, ни от силы тока и является поэтому характеристикой самого *проводника*.

Это отношение называют *сопротивлением* проводника.

Каждый проводник имеет определенное сопротивление: например, из приведенных выше графиков следует, что сопротивление первого проводника больше, чем сопротивление второго: $R_1 > R_2$.

Соотношение между силой тока I в проводнике, напряжением U на его концах и сопротивлением R проводника обычно формулируют как

закон Ома для участка цепи: $I = \frac{U}{R}$.

В дальнейшем было установлено, что закон Ома с хорошей точностью выполняется не только для металлических проводников, но и для электролитов.

ЕДИНИЦА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Единицу сопротивления в системе СИ определяют на основании закона Ома и называют *ом* (обозначается Ом). Если сопротивление проводника равно 1 Ом, то по проводнику течет ток силой 1 А при напряжении на концах проводника 1 В.

Велико ли сопротивление 1 Ом?

Сопротивление, примерно равное 1 Ом, имеет, например, медный провод длиной 15 м с поперечным сечением 0,25 мм². Сопротивление бытовых электроприборов намного больше: например, сопротивление нити накаливания настольной лампы составляет несколько сотен ом.

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Измерения показывают, что сопротивление R провода прямо пропорционально длине провода l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S . Отсюда следует, что $R = \rho \frac{l}{S}$, где величина ρ характеризует уже не провод, а *вещество*, из которого он изготовлен. Эту величину называют *удельным сопротивлением* данного вещества.

Для примера ниже в таблице приведены удельные сопротивления некоторых металлов и сплавов (нихром — сплав никеля с хромом, а фехраль — железа с хромом и алюминием).

Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро, которое считается поэтому лучшим проводником — правда, довольно дорогим. Чуть больше удельное сопротивление меди, но зато медь намного дешевле серебра и поэтому широко используется для изготовления соединительных проводов. С этой же целью часто используют и алюминий: хотя его удельное сопротивление примерно в полтора раза больше, чем у меди, зато он намного дешевле.

Вещество	Удельное сопротивление, Ом · м	Вещество	Удельное сопротивление, Ом · м
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Железо	$10 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Ртуть	$96 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2,4 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$110 \cdot 10^{-8}$
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Фехраль	$130 \cdot 10^{-8}$

Из сплавов с большим удельным сопротивлением (таких, как нихром и фехраль) изготавливают спирали в электронагревательных приборах (электрочайниках, электрокаминах и т. д.).

2. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Естественно предположить, что причиной электрического сопротивления проводников являются столкновения свободных зарядов с атомами или молекулами вещества, так как при таких столкновениях свободные заряды должны отклоняться от направления своего движения, что приводит к появлению «тормозящей» силы.

Именно такой механизм сопротивления и был поначалу предложен учеными. Что же показало сравнение с опытом расчетов, сделанных в этом предположении?

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Для электролитов расчет удельного сопротивления, выполненный в указанном выше предположении, хорошо согласуется с опытными данными.

Удалось понять также, почему

сопротивление электролитов при повышении температуры уменьшается.

Дело в том, что при повышении температуры увеличивается доля молекул, распавшихся на ионы, и поэтому увеличивается число ионов — носителей заряда.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Лучшими проводниками являются металлы. В атомах металлов внешние электроны слабо связаны со своими атомами и поэтому отрываются от них и «обобществляются», становясь принадлежностью всего образца, то есть свободными электронами.

Свободные электроны образуют «электронный газ», окружающий кристаллическую решетку из положительных ионов металла.

Ученые предположили, что электрическое сопротивление металлов обусловлено столкновениями свободных электронов с ионами кристаллической решетки.

Однако это предположение не соответствовало опыту: измеренное сопротивление оказалось в тысячи раз меньше расчетного. Малое удельное сопротивление металлов указывало на то, что свободные электроны движутся сквозь металл почти без столкновений, как бы «не замечая» кристаллическую решетку. Другими словами, свободные электроны оказались гораздо более «свободными», чем предполагалось.

Такое поведение свободных электронов больше напоминало движение волн, чем движение частиц: электроны как бы плавно «обтекали» ионы кристаллической решетки. И дальнейшее изучение показало, что такое «волновое» поведение электронов не случайно — выяснилось, что им объясняется также строение атома (более подробно мы расскажем об этом в § 23. *Квантовая механика*).

Расчеты, выполненные с учетом волновых свойств электронов, привели к настолько необычному предсказанию, что в него трудно было поверить. Согласно этим расчетам получалось, что если бы кристаллическая решетка металла была *идеально периодической*, электронная волна проходила бы сквозь кристалл, *вообще* не отклоняясь от своего направления — как сквозь пустоту. А в таком случае электрическое сопротивление металла должно было бы равняться *нулю*. И такое, равное нулю, сопротивление действительно было обнаружено на опыте! Об этом мы расскажем чуть позже.

В реальном кристалле кристаллическая решетка не является идеально периодической: периодичность нарушают примеси и дефекты решетки, а также отклонения ионов от своих равновесных положений вследствие тепловых колебаний.

Из-за наличия «нерегулярностей» решетки электронная волна рассеивается, то есть направление ее движения изменяется. Расчеты, сделанные в предположении, что это и является причиной электрического сопротивления металлов, подтвердились на опыте.

Как зависит удельное сопротивление металлов от температуры?

Важным свойством металлов, которое также удалось объяснить с помощью описанного выше представления о природе их электрического сопротивления, является зависимость сопротивления от температуры: опыт показывает, что

сопротивление металлов при повышении температуры увеличивается.

При сильном нагревании сопротивление металла увеличивается в несколько раз. Так, сопротивление нити накала электрической лампы в «рабочем состоянии» более чем в 10 раз превосходит ее сопротивление при комнатной температуре.

Увеличение сопротивления металлов при повышении температуры объясняется тем, что при нагревании усиливаются тепловые колебания ионов, то есть увеличивается отклонение кристаллической решетки от идеальной периодичности. Вследствие этого увеличивается рассеяние электронных волн на нерегулярностях решетки. Это и приводит к росту электрического сопротивления при повышении температуры.

3. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В начале 20-го века голландский физик Гейке Каммерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре ниже 4,15 К сопротивление ртути скачком уменьшается до *нуля*. Сила тока в охлажденном до такой температуры ртутном кольце¹ оставалась неизменной годами. Описанное явление назвали *сверхпроводимостью*.

В дальнейшем ученые обнаружили, что ртуть не является исключением: в сверхпроводящем состоянии при достаточно низких температурах переходят многие металлы и сплавы. Исключения, как ни странно, составляют лучшие из проводников — например, серебро и медь: их не удалось сделать сверхпроводниками даже при температуре, очень близкой к абсолютному нулю.

Объяснить явление сверхпроводимости удалось только в середине 20-го века². Оказалось, что та самая кристаллическая решетка, нерегулярности которой при «обычной» температуре являются помехой движению электронов, при низкой температуре, наоборот, «помогает» электронам.

Вследствие взаимодействия электронов с ионами решетки между электронами возникает *притяжение*: один электрон чуть деформирует решетку, вследствие чего другой электрон втягивается в область этой деформации. В результате электроны как бы объединяются в пары, и когда один электрон из пары встречается с нерегулярностью решетки, другой электрон — его партнер — «удерживает» его от столкновения. В результате электроны, «взявшись за руки», свободно проходят сквозь решетку с достаточно малыми нерегулярностями. Чтобы нерегулярности, обусловленные тепловыми колебаниями, были малыми, и необходимо охлаждение металла до низкой температуры.

¹ При столь низкой температуре ртуть является твердым телом.

² Большой вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли советские физики А. А. Абрикосов, Н. Н. Боголюбов, В. Л. Гинзбург, Л. Д. Ландау и американские физики Дж. Бардин, Л. Купер, Дж. Шриффер.

Описанный механизм сверхпроводимости объясняет также, почему лучшие проводники не становятся сверхпроводниками: в таких проводниках слишком слабо взаимодействие между свободными электронами и ионной решеткой. Это делает их лучшими проводниками, но зато «лишает надежды» стать сверхпроводниками.

В конце 20-го века ученые создали сплавы, являющиеся сверхпроводниками при температуре выше 100 К. Благодаря этому стало возможным использовать для охлаждения дешевый жидкий азот (вместо дорогого жидкого гелия), что позволило существенно расширить возможности применения сверхпроводников (например, для создания очень сильных магнитных полей и сверхмощных компьютеров).

Ученые надеются, что в ближайшие десятилетия им удастся получить вещества, являющиеся сверхпроводниками даже при комнатной температуре. Это позволило бы во много раз уменьшить потери электроэнергии при передаче на большие расстояния.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как связано напряжение с силой тока для металлического проводника?
2. Что такое сопротивление проводника? Является ли оно характеристикой проводника или вещества, из которого он изготовлен?
3. Как формулируется закон Ома для участка цепи?
4. Для каких веществ выполняется закон Ома?
5. Какова единица сопротивления в системе СИ?
6. Что такое удельное сопротивление? Является ли оно характеристикой проводника или вещества, из которого он изготовлен?
- 7*. Какова природа электрического сопротивления электролитов?
- 8*. Какова природа электрического сопротивления металлов?
- 9*. Что такое сверхпроводимость?
- 10*. Как найти длину и площадь поперечного сечения медной проволоки, зная ее массу и электрическое сопротивление?

§ 3.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

1. Последовательное соединение
2. Параллельное соединение
3. Измерения силы тока и напряжения

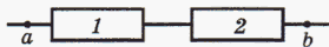
Мы рассмотрим здесь общее сопротивление последовательно и параллельно соединенных проводников и найдем, как в каждом из этих случаев распределяются сила тока и напряжение.

Будет рассказано также, как подключают приборы для измерения силы тока и напряжения.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

При последовательном соединении два проводника соединяются так, как показано на рис. 3.1.

Рис. 3.1. Схема последовательного соединения двух проводников



По определению сопротивления общее сопротивление проводников $R = \frac{U}{I}$, где U — напряжение между точками a и b , а I — сила тока, одинаковая для обоих проводников.

Напряжение между точками a и b равно сумме напряжений на каждом из проводников, то есть $U = U_1 + U_2$.

Согласно закону Ома $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$. Отсюда следует, что $R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2$.

На рис. 3.2 изображена схема последовательного соединения нескольких проводников.

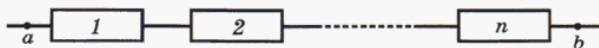


Рис. 3.2. Последовательное соединение нескольких проводников

Так же, как и в случае двух проводников, можно доказать, что общее сопротивление n последовательно соединенных проводников $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

Из этой формулы следует, что при последовательном соединении проводников общее сопротивление цепи *больше* сопротивления любого из проводников.

Заметим также, что при добавлении нового проводника, подключенного последовательно к уже имеющимся, сопротивление цепи всегда *увеличивается*.

Как распределяется напряжение между последовательно соединенными проводниками?

Рассмотрим напряжение на любых проводниках в цепи последовательно соединенных проводников (обозначим эти проводники 1 и 2). Из закона Ома следует, что $\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} = \frac{R_1}{R_2}$, то есть

при последовательном соединении напряжение больше на том проводнике, у которого сопротивление больше.

Пример

Рассмотрим нить накала лампы и соединительные провода, ведущие к розетке. Нить очень тонкая, поэтому ее сопротивление во много раз (в сотни или даже тысячи) больше, чем сопротивление соединительных проводов.

Поэтому при включенной лампе практически все напряжение (или, как иногда говорят, «падение напряжения») приходится на нить накала.

2. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

При параллельном соединении два проводника соединяют так, как показано на рис. 3.3.

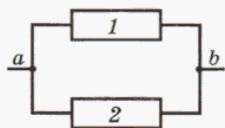


Рис. 3.3. Параллельное соединение двух проводников

По определению сопротивления, общее сопротивление проводников $R = \frac{U}{I}$, где I — сила тока, равная сумме сил токов в проводниках 1 и 2, то есть $I = I_1 + I_2$, а U — *напряжение, одинаковое для обоих проводников* (то есть напряжение между точками а и b).

Чтобы найти общее сопротивление, в данном случае удобнее «перевернуть» соотношение $R = \frac{U}{I}$, записав его в виде $\frac{1}{R} = \frac{I}{U}$.

Согласно закону Ома $I_1 = \frac{U}{R_1}$, $I_2 = \frac{U}{R_2}$, поэтому получаем

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Приводя к общему знаменателю и «переворачивая» снова, получаем $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

На рис. 3.4 изображена схема параллельного соединения нескольких проводников.

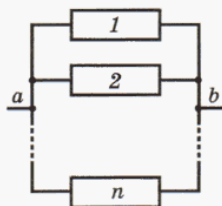


Рис. 3.4. Параллельное соединение нескольких проводников

Так же как и в случае двух проводников, можно доказать, что

$$\text{для } n \text{ параллельно соединенных проводников } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Из этой формулы следует, что при параллельном соединении проводников общее сопротивление цепи *меньше* сопротивления любого из проводников.

Заметим также, что при добавлении нового проводника, подключенного параллельно к уже имеющимся, сопротивление цепи всегда *уменьшается*.

Как распределяется сила тока между параллельно соединенными проводниками?

Обозначим два любых проводника в цепи параллельно соединенных проводников числами 1 и 2. Тогда из закона Ома следует,

$$\text{что } \frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1}, \text{ то есть}$$

при параллельном соединении сила тока больше в том проводнике, у которого сопротивление меньше.

Пример

Чтобы напряжение на всех электроприборах в квартире было одинаковым, их подключают *параллельно*: ко всем розеткам в квартире подведено одинаковое напряжение.

Мы уже знаем, что больший ток идет через тот из двух параллельно соединенных приборов, сопротивление которого *меньше* (как мы увидим в § 14. Работа и мощность постоянного тока, этот прибор потребляет и большую мощность, так как при одинаковом напряжении большую мощность потребляет прибор, через который идет больший ток).

Сравним теперь нити накаливания двух ламп разной яркости. Заметьте, какая из двух ламп светит ярче, и, выключив лампы, рассмотрите внимательно их нити накаливания.

Вы заметите, что у той лампы, которая светила ярче, нить накаливания более толстая.

Сопротивление провода обратно пропорционально площади его поперечного сечения. Значит, сопротивление нити более яркой лампы *меньше*, чем сопротивление нити менее яркой лампы.

Следовательно, когда лампы светили, через более яркую лампу шел ток большей силы.

3. ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Из курса физики основной школы вы уже знаете, что

силу тока измеряют амперметром, а напряжение — вольтметром.

Рассмотрим, как правильно подключать эти приборы при измерении силы тока в данном проводнике и напряжения на концах проводника.

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

Амперметр измеряет силу тока в проводнике, поэтому его надо подключать так, чтобы сила тока, проходящего через амперметр, была равна силе тока в проводнике. Отсюда следует, что

амперметр надо подключать последовательно с проводником, в котором измеряют силу тока.

Чтобы подключение амперметра не изменяло заметно силу тока, сопротивление амперметра должно быть намного меньше сопротивления проводника.

На рис. 3.5 изображена схема правильного подключения амперметра.

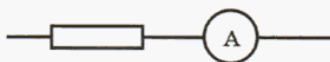


Рис. 3.5. Схема подключения амперметра к проводнику при измерении силы тока в проводнике

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

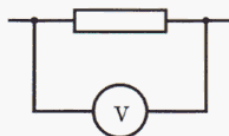
Вольтметр измеряет напряжение на концах данного проводника, поэтому его надо подключать так, чтобы напряжение на вольтметре было равно напряжению на концах проводника. Отсюда следует, что

вольтметр надо подключать параллельно проводнику, на котором измеряют напряжение.

Чтобы подключение вольтметра не изменяло заметно напряжение на измеряемом участке цепи, сопротивление вольтметра должно быть намного больше сопротивления проводника.

На рис. 3.6 изображена схема правильного подключения вольтметра.

Рис. 3.6. Схема подключения вольтметра к проводнику при измерении напряжения на концах проводника



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Начертите схему последовательного соединения проводников.
2. Чему равно общее сопротивление проводников при их последовательном подключении?
3. Как распределяется напряжение между последовательно соединенными проводниками?
4. Начертите схему параллельного соединения проводников.
5. Чему равно общее сопротивление проводников при их параллельном подключении?
6. Как распределяется сила тока между параллельно соединенными проводниками?
7. Как надо подключать амперметр при измерении силы тока?
8. Как надо подключать вольтметр при измерении напряжения?
- 9*. Кусок проволоки разрезали на 5 частей и скрутили из них жгут. Во сколько раз сопротивление жгута меньше сопротивления неразрезанной проволоки?

§ 4.

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Работа тока и закон Джоуля — Ленца

2. Мощность тока

Количество теплоты, выделившееся в проводнике при прохождении тока, можно выразить через силу тока, сопротивление проводника и время прохождения тока.

Мы рассмотрим также вопрос о мощности тока.

1. РАБОТА ТОКА И ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

РАБОТА ТОКА

Напряжение U на концах проводника связано с работой A электрического поля по перемещению заряда q соотношением $U = \frac{A}{q}$. Отсюда следует, что при перемещении заряда q вдоль проводника поле совершает работу $A = qU$, где U — разность потенциалов на концах проводника. Эту работу называют *работой тока*. Поскольку $q = It$, работу тока можно записать в виде $A = UIt$.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Рассмотрим практически важный случай, когда единственным действием тока является тепловое действие.

Тогда, согласно закону сохранения энергии, количество теплоты, выделившейся в проводнике, равно работе тока: $Q = A$. Следовательно, $Q = IUt$.

Напряжение U и сила тока I связаны законом Ома $U = IR$, поэтому можно записать три эквивалентные формулы для

количества теплоты, выделившейся в проводнике с током:

$$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t.$$

Мы вывели эти формулы, используя закон сохранения энергии, но исторически соотношение $Q = I^2Rt$ независимо друг от друга установили на опыте российский ученый Э. Х. Ленц и английский ученый Дж. Джоуль за несколько лет до открытия закона сохранения энергии. Поэтому его формулируют как

закон Джоуля — Ленца: выделившееся в проводнике количество теплоты $Q = I^2Rt$, где I — сила тока, R — сопротивление проводника, t — время прохождения тока.



Эмилий Христианович Ленц
(1804—1865)



Джеймс Прескотт Джоуль
(1818—1889)

СРАВНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРОВОДНИКОВ

Сравним две формулы для количества теплоты, выделяющейся в проводнике: $Q = I^2 R t$ и $Q = \frac{U^2}{R} t$. Согласно первой из них количество теплоты *прямо* пропорционально сопротивлению проводника, а согласно второй — *обратно* пропорционально.

Поэтому может возникнуть вопрос: не противоречат ли эти формулы друг другу?

Чтобы убедиться, что противоречия здесь нет, сравним количества теплоты, выделяющейся в двух проводниках при их последовательном и параллельном соединении.

Последовательное соединение

При последовательном соединении (рис. 4.1) *сила тока в проводниках одинакова*: $I_1 = I_2 = I$.

Поэтому для сравнения количеств теплоты, выделяющейся в проводниках при последовательном соединении, надо использовать ту формулу, которая выражает количество теплоты через *одинаковую силу тока*. Значит, в случае последовательного соединения надо пользоваться формулой $Q = I^2 R t$. И для отношения количеств теплоты, выделившейся в проводниках, получаем $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{I^2 R_1 t}{I^2 R_2 t} = \frac{R_1}{R_2}$.

Таким образом,

при последовательном соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, имеющем большее сопротивление.



Рис. 4.1. При последовательном соединении сила тока в проводниках одинакова

Пример

Сопротивление нити лампы накаливания в сотни раз больше, чем сопротивление соединительных проводов. Поэтому в соответствии с законом Джоуля — Ленца и количество теплоты, выделяющейся в нити накаливания лампы, во столько же раз больше количества теплоты, выделяющейся в проводах: нить раскалена добела, а провода остаются холодными.

Параллельное соединение

При параллельном соединении (рис. 4.2) *напряжение на концах проводников одинаково*: $U_1 = U_2 = U$.

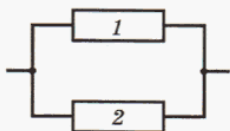


Рис. 4.2. При параллельном соединении напряжение на концах проводников одинаково

Поэтому для сравнения количеств теплоты, выделяющейся в проводниках при параллельном соединении, надо использовать ту формулу, которая выражает количество теплоты через *одинаковое напряжение*. Значит, в случае параллельного соединения надо пользоваться формулой $Q = \frac{U^2}{R} t$. При этом для отношения количеств теплоты, выделившейся в проводниках, получаем

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U^2 R_2 t}{U^2 R_1 t} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Таким образом,

при параллельном соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, имеющем меньшее сопротивление.

Пример

Все электролампы в квартире включены параллельно. Поэтому большее количество теплоты выделяется в лампах, имеющих *меньшее* сопротивление.

Рассмотрите нити накаливания двух разных по яркости ламп (выключив лампы). Вы увидите, что в той лампе, которая светила ярче, толщина нити накаливания больше, а следовательно, ее сопротивление меньше.

Поставим опыт

Легко убедиться на опыте в том, что *одни и те же лампы* в зависимости от вида подключения «меняются яркостью»! При обычном (то есть парал-

лельном) соединении ярче горит лампа с меньшим сопротивлением, но если эти же лампы соединить последовательно, ярче будет светить «менее яркая» лампа, то есть лампа с большим сопротивлением (рис. 4.3).

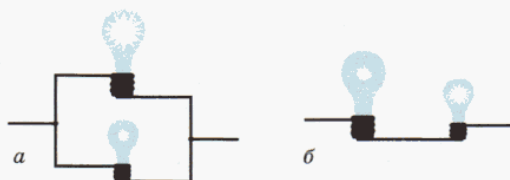


Рис. 4.3. Изменение яркости ламп в зависимости от типа соединения: *а* — параллельное соединение, *б* — последовательное соединение

Этот опыт всегда вызывает удивление — настолько странной кажется резкая «перемена ролей» ламп «всего лишь» при изменении типа их соединения.

2. МОЩНОСТЬ ТОКА

Мощностью тока P называют отношение работы тока A к промежутку времени t , в течение которого эта работа была совершена: $P = \frac{A}{t}$.

Поскольку $A = IUt$, получаем $P = IU$. Используя закон Ома, можно записать три эквивалентные формулы для

мощности тока: $P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}$.

Мощность тока, как и любая мощность, измеряется в системе СИ в ваттах (Вт). Мощность равна 1 Вт, если за 1 с совершается работа 1 Дж.

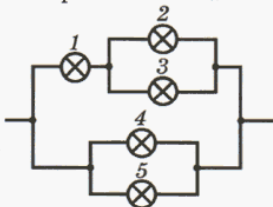
Каждый электрический прибор характеризуется потребляемой им мощностью (обычно она указывается на приборе). Ниже в таблице приведены примерные значения мощности некоторых приборов (для сравнения: мощность, развиваемая человеком при ходьбе, — около 100 Вт).

Прибор	Мощность, Вт
Лампа карманного фонарика	около 1
Лампы накаливания осветительные	25—150
Электронагреватель	200—1000
Пылесос	до 1300—1500
Электрочайник	около 2000



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие вы знаете формулы для расчета количества теплоты, выделившейся в проводнике с током?
2. Какой формулой для сравнения количеств теплоты, выделившейся в проводниках, надо пользоваться при последовательном соединении проводников? при параллельном? Обоснуйте свой ответ.
3. Что такое мощность тока? Приведите примеры мощности некоторых электроприборов.
4. Два проводника сопротивлениями 1 и 2 Ом соединили последовательно. В каком проводнике выделяется большая мощность, когда по ним идет ток? Во сколько раз большая?
5. Два проводника сопротивлениями 5 и 20 Ом соединили параллельно. В каком проводнике выделяется большая мощность, когда по ним идет ток? Во сколько раз большая?
6. Во сколько раз сила тока в лампе мощностью 75 В меньше, чем сила тока в электрочайнике мощностью 2 кВт?
- 7*. На лампочке карманного фонарика написано: «4 В; 1 Вт», а на лампе, которая горит в прихожей, написано: «220 В; 40 Вт». В какой лампе больше сила тока? Сопротивление какой лампы больше и во сколько раз?
- 8*. На часть раскаленной спирали, подключенной к сети, попала вода. Увеличится или уменьшится выделяемое в спирали количество теплоты? Увеличится или уменьшится накал той части спирали, на которую не попала вода?
- 9*. Стальной и медный провода одинаковых размеров подключают к источнику тока один раз соединенными параллельно, а другой раз — последовательно. В каком из проводов выделится в каждом из этих случаев большее количество теплоты?
- 10*. Желая улучшить освещение, одну лампу заменили двумя такими же, соединенными последовательно. Действительно ли после этого освещение улучшилось? Как изменилась мощность тока на этом участке цепи? При расчетах зависимость сопротивления от температуры не учитывайте.
- 11*. Как изменится мощность, выделяемая в проводе, если его разрезать пополам и полученные части соединить параллельно?



- 12*. Какая (какие) из одинаковых ламп в цепи, схема которой изображена на рисунке, будет гореть ярче других? Какая (какие) более тусклая?

§5.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

1. Источник тока
2. Закон Ома для полной цепи
3. Передача энергии в электрической цепи

Мы рассмотрим здесь условия существования тока в замкнутой цепи и выясним роль источника тока. Основной характеристикой источника тока является его электродвижущая сила.

Мы выведем также закон Ома для полной цепи, то есть цепи, включающей источник тока.

1. ИСТОЧНИК ТОКА

При прохождении тока проводник нагревается, то есть в нем выделяется некоторое количество теплоты. Следовательно, согласно закону сохранения энергии при перемещении свободных зарядов по проводнику электростатическое поле *совершает работу*.

Но если в электрической цепи *выделяется* энергия, то, согласно тому же закону сохранения энергии, точно в таком же количестве энергия должна и *поступать* в электрическую цепь.

Возникают вопросы: на каком участке цепи это происходит и какими физическими явлениями обусловлено поступление энергии в электрическую цепь?

Прежде всего выясним: может ли источником энергии в электрической цепи быть само электростатическое поле?

Как вы уже знаете из курса физики 10-го класса, при перемещении заряда по *замкнутой* траектории работа электростатического поля равна *нулю*. Значит, *только* под действием электростатического поля свободные заряды не могут двигаться вдоль всей *замкнутой* цепи.

СТОРОННИЕ СИЛЫ

Из сказанного следует, что для существования тока в замкнутой цепи необходимо, чтобы хотя бы на одном участке цепи на заряды действовали силы *неэлектростатического* происхождения. Эти силы называют *сторонними силами*. Они действуют на заряды *внутри источника тока*, и именно эти силы «поставляют» энергию в электрическую цепь.

В источнике тока под действием сторонних сил происходит *разделение зарядов*, в результате чего на одном полюсе источника накапливается положительный заряд, а на другом — отри-

цательный. В результате между полюсами источника возникает разность потенциалов, являющаяся необходимым условием существования тока во *внешней части цепи*.

Электростатическое поле *внутри* источника «мешает» движению свободных зарядов: при наличии тока в цепи свободным зарядам внутри источника приходится двигаться *против* сил электростатического поля (рис. 5.1).

Например, в химическом источнике тока положительные ионы движутся к положительному полюсу, накапливая на этом полюсе положительный заряд, хотя электростатическое поле «тянет» положительные ионы к отрицательному полюсу. Такое движение свободных зарядов внутри источника тока возможно именно потому, что внутри источника на них действует не только электростатическое поле, но и *сторонние силы*.



Рис. 5.1. Вне источника тока свободные заряды движутся под действием сил электростатического поля, но внутри источника они движутся против сил этого поля благодаря действию сторонних сил

Природа сторонних сил

В *химических элементах тока* сторонние силы имеют химическую природу. Они могут быть обусловлены, например, различием в скорости перехода положительных ионов разных металлов с проводников в электролит.

Так, при погружении цинкового и медного электродов в серную кислоту положительные ионы цинка быстрее покидают электрод, чем ионы меди. В результате цинковый электрод заряжается отрицательно по отношению к медному, вследствие чего цинковый электрод становится отрицательным полюсом источника тока, а медный — положительным.

В *генераторах электростанций* сторонние силы — это обычно силы, действующие на свободные электроны проводника со стороны вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем. Более подробно мы расскажем об этом в § 10. *Производство, передача и потребление электроэнергии.*

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИСТОЧНИКА ТОКА

Внутри источника тока сторонние силы, перемещая свободные заряды против действия сил электростатического поля, совершают работу $A_{\text{стор}}$.

Эта работа пропорциональна заряду, перемещенному внутри источника (а следовательно, и вдоль всей цепи), поэтому отношение работы сторонних сил по перемещению заряда внутри источника к величине заряда является характеристикой самого источника тока. Это отношение называется *электродвижущей силой источника*¹ (ЭДС) и обозначается $\mathcal{E}$. Таким образом,

$$\text{электродвижущая сила } \mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

ЭДС источника численно равна работе по перемещению единичного положительного заряда внутри источника от его отрицательного полюса к положительному (то есть против действия кулоновских сил). ЭДС, как и напряжение, измеряется в вольтах.

2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

При перемещении заряда q внутри источника тока сторонние силы совершают работу $A_{\text{стор}} = q\mathcal{E}$, где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника.

При протекании тока во внешней цепи выделяется количество теплоты $Q_{\text{внешн}} = I^2 R t = (It)IR = qIR$, где R — сопротивление внешней цепи. В источнике тока тоже выделяется количество теплоты. Оно равно $Q_{\text{внутр}} = I^2 r t = qIr$, где r — сопротивление источника, которое называют его *внутренним сопротивлением*.

Согласно закону сохранения энергии $A_{\text{стор}} = Q_{\text{внешн}} + Q_{\text{внутр}}$, откуда получаем $q\mathcal{E} = qIR + qIr$, или $\mathcal{E} = IR + Ir$.

Сумму сопротивлений $R + r$ называют *полным сопротивлением цепи* и полученное соотношение формулируют как

закон Ома для полной цепи: сила тока в замкнутой цепи, содержащей один источник, равна отношению ЭДС источника к полному сопротивлению цепи: $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$.

СИЛА ТОКА В ЦЕПИ И НАПРЯЖЕНИЕ НА ПОЛЮСАХ ИСТОЧНИКА

Из закона Ома для полной цепи следует, что от внешнего сопротивления цепи R зависит не только сила тока I в цепи, но и напряжение U на полюсах источника. Рассмотрим это подробнее.

Сила тока

Как следует из закона Ома для полной цепи, сила тока $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ убывает с увеличением R .

¹ Это название не совсем удачно, потому что это не «сила» в механическом смысле, а *энергетическая характеристика источника*.

График зависимости силы тока от внешнего сопротивления изображен на рис. 5.2.

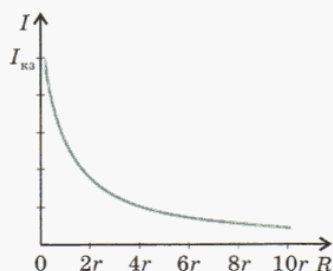


Рис. 5.2. График зависимости силы тока от внешнего сопротивления цепи. Когда внешнее сопротивление равно нулю (короткое замыкание), сила тока максимальна

Наибольшая сила тока соответствует $R = 0$, то есть когда внешнее сопротивление цепи равно нулю или полюса источника замкнуты «накоротко». Поэтому этот случай называют *коротким замыканием*.

При коротком замыкании сила тока $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$.

Из этой формулы видно, что если внутреннее сопротивление источника очень мало, ток короткого замыкания будет очень большим, что может вывести источник из строя. Это имеет место, например, для автомобильных аккумуляторов.

Разомкнутой цепи соответствует бесконечно большое сопротивление R . При этом, как следует из закона Ома для полной цепи, сила тока $I = 0$.

Напряжение на полюсах источника

Согласно закону Ома для участка цепи напряжение на полюсах источника тока $U = IR$, где R — сопротивление внешней цепи. Используя закон Ома для полной цепи, получаем $U = IR = \frac{\mathcal{E}R}{R + r}$.

На рис. 5.3 изображен график зависимости напряжения на полюсах источника от внешнего сопротивления.

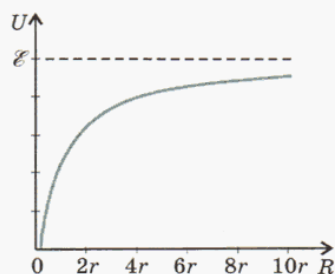


Рис. 5.3. При увеличении внешнего сопротивления напряжение на полюсах источника увеличивается, стремясь к величине, равной ЭДС источника

Наименьшее напряжение между полюсами источника будет при коротком замыкании, когда напряжение равно нулю.

А наибольшее напряжение соответствует разомкнутой цепи, то есть бесконечно большому сопротивлению R . В этом случае можно пренебречь величиной r в знаменателе приведенной выше формулы для напряжения, в результате чего получим $U = \mathcal{E}$.

Итак,

напряжение между разомкнутыми полюсами источника равно ЭДС этого источника.

3. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Очень важный элемент цепи — *соединительные провода*, так как широкое использование электричества обусловлено тем, что с его помощью можно передавать энергию на тысячи километров.

Всем известно, что электроэнергия передается «по проводам», а многие даже уверены, что она идет «внутри» провода, то есть что ее несут электроны, направленное движение которых представляет собой электрический ток в металле.

Но так ли это? Рассмотрим конкретный пример.

По медному проводу длиной несколько метров и сечением 1 мм^2 можно передавать каждую секунду энергию, равную тысяче джоулей — этого достаточно, чтобы за несколько минут поднять слона на третий этаж. Однако кинетическая энергия направленного движения электронов в проводе несравненно меньше этой энергии. Действительно, мы уже знаем, что средняя скорость направленного движения электронов меньше скорости улитки, а суммарная масса свободных электронов в метровом куске медного провода сечением 1 мм^2 составляет около одной десятичной доли грамма.

Так что же тогда «несет» электроэнергию и где она «мчится», если не внутри провода?

Оказывается, энергию «несет» *электромагнитное поле*, и «мчится» она в пространстве, *окружающем* провод, а не *в* проводе.

Как мы увидим ниже (см. § 7. *Магнитное поле*), проводник с током всегда окружен магнитным полем, созданным этим током. Кроме того, провода, подключенные к полюсам источника тока, электрически заряжены и, следовательно, создают вокруг себя и электрическое поле. Так вот: именно комбинация этих *двух* полей, окружающих проводник с током, — *магнитного и электрического* — и переносит энергию от источника тока к потребителю вдоль проводов. Причем переносит с наибольшей возможной скоростью — со скоростью света.

Но зачем же тогда нужны провода и «ползущие» по ним электроны?

Они нужны для того, чтобы *направлять* поток энергии электромагнитного поля. Дело в том, что этот поток энергии существует только там, где есть *оба* поля — магнитное и электрическое (направленные под углом друг к другу). Таким образом, провода с током — это не «трубы», внутри которых течет энергия, а «рельсы», играющие роль направляющих для потока энергии электромагнитного поля.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. При каком условии ток может течь в замкнутой цепи?
2. На каком участке цепи свободные заряды движутся против сил электростатического поля?
3. Что такое сторонние силы?
4. Что такое электродвижущая сила источника тока?
5. Как формулируется закон Ома для полной цепи?
6. Чему равен ток короткого замыкания? Какому сопротивлению внешней цепи он соответствует?
7. Какое внешнее сопротивление соответствует разомкнутой цепи?
- 8*. Как связано напряжение на разомкнутых полюсах источника с ЭДС источника?
- 9*. В замкнутой цепи сторонние силы совершили за некоторое время работу 10 Дж. Можно ли утверждать, что кулоновские силы совершили такую же работу? Обоснуйте свой ответ.
- 10*. ЭДС батарейки карманного фонарика 4,5 В. Будет ли от этой батарейки гореть полным накалом лампочка, рассчитанная тоже на 4,5 В? Обоснуйте свой ответ.



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

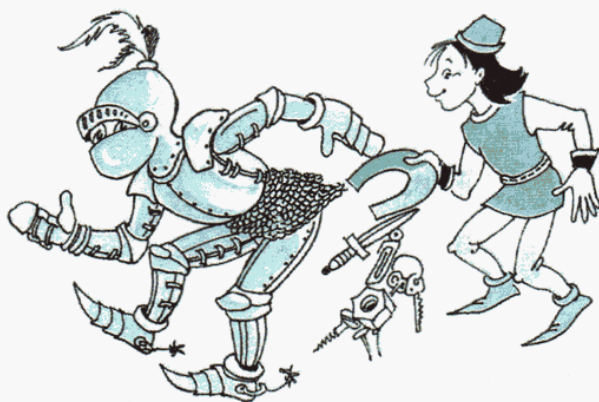
- **Сила тока I** — физическая величина, равная отношению заряда q , перенесенного через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , к этому промежутку времени:
$$I = \frac{q}{t}.$$
 Силу тока измеряют в амперах.
- Основные действия тока: *тепловое, магнитное и химическое.*
- **Закон Ома для участка цепи:** напряжение U на концах проводника пропорционально силе тока I в проводнике: $U = IR$. Коэффициент пропорциональности R называется *сопротивлением* проводника.

- Сопротивление провода $R = \rho \frac{l}{S}$, где l — длина провода, S — площадь его поперечного сечения, а ρ — *удельное сопротивление* вещества, из которого сделан провод.
- Электрическое сопротивление *электролитов* обусловлено столкновением ионов с молекулами и ионами электролита. Сопротивление электролитов при нагревании *уменьшается*.
- Электрическое сопротивление *металлов* обусловлено рассеянием свободных электронов на нерегулярностях кристаллической решетки. Сопротивление металлов при нагревании *увеличивается*.
- Многие металлы и сплавы переходят при достаточно низких температурах в сверхпроводящее состояние, когда их электрическое сопротивление скачком уменьшается до нуля.
- При *последовательном* соединении проводников их общее сопротивление равно сумме сопротивлений этих проводников: $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$. При этом напряжение больше на том проводнике, у которого сопротивление больше.
- При *параллельном* соединении проводников их общее сопротивление R можно найти с помощью формулы $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$. При этом сила тока больше в том проводнике, у которого сопротивление меньше.
- Для измерения силы тока в проводнике *амперметр* подключают *последовательно* с этим проводником, а для измерения напряжения на концах проводника *вольтметр* подключают *параллельно* этому проводнику.
- *Закон Джоуля — Ленца*: $Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R} t$.
- При *последовательном* соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, имеющем большее сопротивление, а при *параллельном* соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, имеющем меньшее сопротивление.
- *Мощность тока* $P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}$.
- Внутри источника тока на свободные заряды действуют силы неэлектростатического происхождения, называемые *сторонними силами*.

- **Электродвижущая сила источника (ЭДС)** — отношение работы сторонних сил по перемещению заряда внутри источника к заряду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$.
- **Закон Ома для полной цепи:** $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$, где R — внешнее сопротивление цепи, а r — внутреннее сопротивление источника тока.
- **Ток короткого замыкания** $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$, где r — внутреннее сопротивление источника тока.
- **Напряжение между разомкнутыми полюсами источника тока** равно ЭДС этого источника.

Глава 2

МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



Между движущимися электрическими зарядами существуют не только электрические, но и магнитные взаимодействия. Они проявляются, например, при взаимодействии проводников, по которым текут токи.

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля. В этой главе мы расскажем об основных свойствах магнитного поля и о наглядном представлении его с помощью линий магнитной индукции.

§ 6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОВ И ТОКОВ

1. Взаимодействие магнитов
2. Взаимодействие проводников с токами и магнитов
3. Взаимодействие проводников с токами
4. Связь между электрическим и магнитным взаимодействиями

Мы расскажем здесь о взаимодействии постоянных магнитов, о действии магнитов на проводники, по которым текут токи, а также о взаимодействии таких проводников друг с другом.

Французский физик Андре Мари Ампер предположил, что свойства постоянных магнитов обусловлены существованием в них незатухающих «молекулярных токов».

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОВ

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

Удивительные «притягательные» свойства магнитов люди обнаружили очень давно. И даже научились использовать их (рис. 6.1).

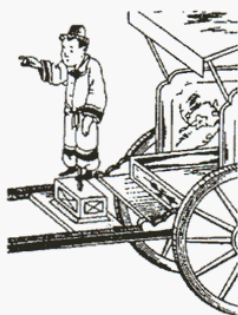


Рис. 6.1. Компас, изобретенный более 4 тысяч лет назад в Древнем Китае

Эта фигурка на военной повозке указывала всегда на юг.

Свое название магниты получили, видимо, от названия провинции Магнесия в Древней Греции, где и сегодня часто встречаются природные магниты. В Древней Греции их называли «геркулесовыми» камнями: согласно легенде они обладали способностью вырывать из обуви путников железные гвозди.

Как вы уже знаете из курса физики основной школы, у любого магнита есть «северный» и «южный» полюса (полюсами магнита называют те его части, вблизи которых действие магнита про-

является наиболее сильно). Северный полюс магнита обозначают¹ буквой N, а южный — буквой S.

Опыт показывает, что

одноименные полюса магнитов отталкиваются, а разноименные — притягиваются (рис. 12.2).

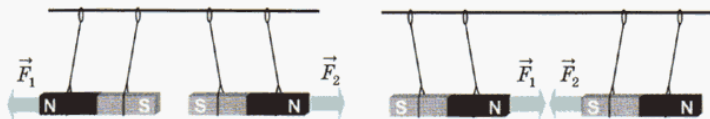


Рис. 6.2. Взаимодействие постоянных магнитов

Разъединить полюса магнита и получить «одиночные» магнитные полюса (только северный и только южный) невозможно: если распилить или разломать магнит, получатся два меньших магнита и у каждого из них будет снова *два* полюса — северный и южный.

Обычно магнит имеет форму удлиненного бруска или подковообразную форму. Но он может иметь и любую другую форму — например шара. Кстати, именно на таком большом шарообразном магните все мы живем.

Расскажем об этом подробнее.

ГДЕ НАХОДЯТСЯ МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ?

В конце 16-го века английский ученый Уильям Гилберт догадался: раз «северный» конец стрелки компаса указывает всегда на север, значит, Земля является огромным магнитом. Поведение магнитов издавна представлялось людям загадочным, поэтому книга Гилберта «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле» сразу приобрела широкую известность.

Северный полюс магнита притягивается к южному полюсу другого магнита. Следовательно, поскольку северный конец магнитной стрелки указывает на север, вблизи Северного географического полюса Земли находится ее южный магнитный полюс.

Северный же магнитный полюс Земли расположен вблизи ее Южного географического полюса.

Однако так было не всегда: раскопки, по которым можно проследить намагничивание ископаемых в разные геологические

¹ Такие обозначения полюсов магнита связаны с названиями сторон света «север» и «юг» на многих европейских языках. Например, в английском «север» — *north* (N), а «юг» — *south* (S).

эпохи, свидетельствуют, что магнитные полюса Земли движутся. А когда-то Земля даже была «намагничена наоборот»!

Хотя земной магнетизм открыт более четырех веков назад, он до сих пор остается загадкой: ученые высказывают различные предположения о происхождении земного магнетизма, но к единому мнению они пока не пришли.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ И МАГНИТОВ

ОПЫТ ЭРСТЕДА

До начала 19-го века электрические и магнитные явления изучались по отдельности. Но в 1820 году произошел редкий в науке случай: выдающееся открытие было сделано не в лаборатории, а на лекции, прямо на глазах студентов — и, более того, благодаря наблюдательности одного из них.

Датский физик Ханс Кристиан Эрстед намеревался продемонстрировать студентам нагревание проволоки электрическим током. Вблизи проволоки случайно оказалась магнитная стрелка (предыдущая лекция была посвящена магнитным свойствам вещества). И, когда лектор включил ток, один из студентов обратил его внимание на то, что *магнитная стрелка повернулась!*

Эрстед был настолько поражен этим, что прервал лекцию и тут же начал исследовать удивительное действие проводника с током на магнитную стрелку. В отличие от уже известных действий на расстоянии, это было не притяжение и не отталкивание, а «поворот»: магнитная стрелка стремилась расположиться *перпендикулярно* проводнику с током (рис. 6.3).



Ханс Кристиан Эрстед
(1777—1851)

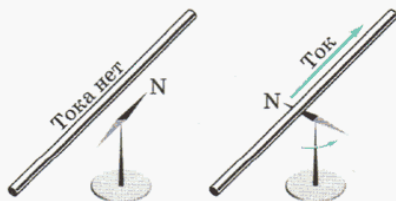


Рис. 6.3. Поворот магнитной стрелки при включении тока

Эрстед и его опыт сразу стали знаменитыми, но все-таки никто тогда еще не мог предвидеть грандиозных последствий его открытия.

А ведь чуть заметное движение магнитной стрелки стало предвестником перехода от «века пара» к «веку электричества».

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ

Следующий шаг в сближении электричества и магнетизма сделал французский физик Андре Мари Ампер.

Он догадался, что если проводники с токами взаимодействуют с магнитами, то эти проводники должны взаимодействовать и друг с другом, причем физическая природа этого взаимодействия такова же, как природа взаимодействия магнитов.

Опыты, поставленные Ампером, подтвердили его догадку. Оказалось, что проводники с токами действительно взаимодействуют друг с другом — например,

параллельные проводники с током притягиваются, если токи в проводниках текут в одном направлении, и отталкиваются, если токи текут в противоположных направлениях (рис. 6.4).

Обратите внимание: взаимодействие проводников, по которым текут токи, обусловлено не электрическим взаимодействием, так как эти проводники электрически нейтральны.

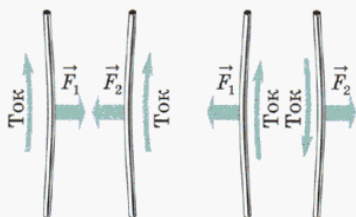


Рис. 6.4. Взаимодействие параллельных проводников с токами



Андре Мари Ампер
(1775—1836)

Единица силы тока

Взаимодействие проводников, по которым текут токи, использовали для определения единицы силы тока в системе СИ.

Единицу силы тока в честь Ампера называли *ампером* (А).

Единицу силы тока определяют, используя взаимодействие двух параллельных прямолинейных очень длинных проводников, по которым текут токи. Если проводники расположены в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, и в каждом из них сила тока равна 1 А, то они взаимодействуют с силой, равной $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИТКОВ И КАТУШЕК С ТОКАМИ

Исследуя взаимодействие катушек, по которым текут токи, друг с другом и с постоянными магнитами, Ампер заметил, что торцы катушек с токами подобны полюсам магнита (рис. 6.5).

При изменении направления тока в катушке ее «северный» и «южный» магнитные полюса меняются местами, как изображено на рис. 6.6.

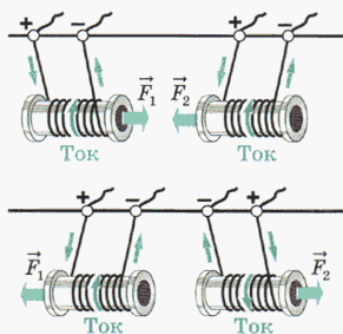


Рис. 6.5. Взаимодействие катушек с токами (сравните с рис. 6.2)

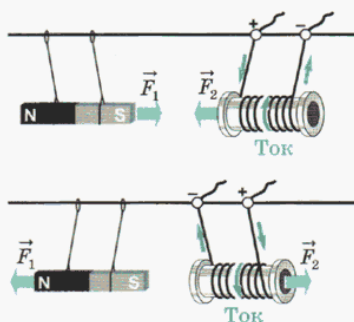


Рис. 6.6. Вверху левому торцу катушки соответствует северный полюс магнита, а внизу — южный

4. СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

ГИПОТЕЗА АМПЕРА

Наблюдая сходство во взаимодействии катушек, по которым текут токи, и магнитов, Ампер предположил, что все магнитные взаимодействия обусловлены взаимодействием электрических токов. Это предположение получило название *гипотезы Ампера*.

Согласно этой гипотезе свойства постоянных магнитов обусловлены циркулирующими в них *одинаково направленными* незатухающими «молекулярными» токами. Во внутренних частях магнита «соседние» молекулярные токи направлены противоположно и поэтому компенсируют друг друга. Но вблизи поверхно-

сти магнита эти токи текут в *одном* направлении, образуя как бы ток, обтекающий поверхность магнита (рис. 6.7).

Этот «поверхностный ток», как считал Ампер, и сообщает постоянному магниту его магнитные свойства.

Гипотеза Ампера объясняет также, почему не удастся разъединить полюса магнита: ведь каждая половинка магнита снова подобна катушке с током.

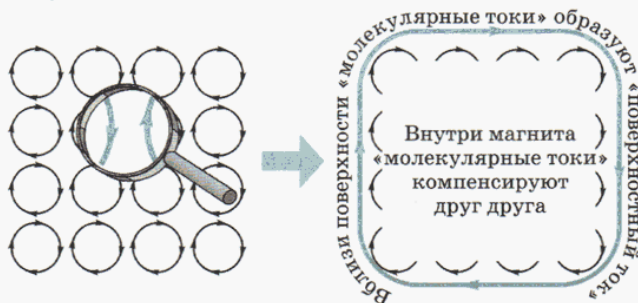


Рис. 6.7. Гипотеза Ампера, объясняющая сходство между постоянными магнитами и катушками с током

В дальнейшем гипотеза Ампера подтвердилась лишь частично. Выяснилось, что «молекулярные» токи действительно существуют: они обусловлены движением электронов в атомах. Однако магнитное взаимодействие, связанное с этими токами, не может объяснить существования постоянных магнитов: во-первых, магнитное взаимодействие таких токов слишком слабо, во-вторых, эти токи ориентированы хаотично. «Секрет» постоянных магнитов оказался в другом.

Выяснилось, что каждый электрон (о существовании которых Ампер, конечно, не мог знать) *сам по себе* является микроскопическим магнитом. И в некоторых веществах, например в железе, электроны близко расположенных атомов ориентируются *одинаково*. Такие области одинаковой намагниченности называют доменами. Каждый домен представляет собой крошечный магнитик, поэтому любой железный образец является как бы совокупностью очень маленьких магнитиков.

Обычно железный образец не проявляет магнитных свойств, так как домены в нем ориентированы хаотично. Но если поместить этот образец вблизи сильного магнита, то под действием магнита домены в образце через некоторое время ориентируются одинаково. И тогда этот железный образец сам станет постоянным магнитом.

ПОЧЕМУ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ С ТОКОМ ЕСТЬ ТОЛЬКО МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ?

Исследования показали, что взаимодействие проводников, по которым текут токи, обусловлено *магнитным взаимодействием между движущимися заряженными частицами*.

Между такими частицами существует, конечно, и электрическое взаимодействие. Например, между электронами в электронном пучке, дающем изображение на экране телевизора, существует как электрическое отталкивание, так и магнитное притяжение.

Почему же тогда между проводниками, по которым текут токи, существует только *магнитное* взаимодействие?

Дело в том, что проводники в целом *электрически нейтральны*, и поэтому электрические взаимодействия между *всеми* заряженными частицами (как движущимися, так и покоящимися) в различных проводниках полностью компенсируются. Магнитное же взаимодействие существует только между *движущимися* заряженными частицами, и поэтому в нем «участвуют» только движущиеся заряженные частицы, создающие электрический ток.

Вот почему между проводниками, по которым текут токи, и проявляется только магнитное взаимодействие.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как взаимодействуют постоянные магниты?
2. Можно ли получить «одиночные» магнитные полюса — только северный или только южный?
3. Где находится северный магнитный полюс Земли?
4. Какое действие оказывает проводник с током на магнитную стрелку?
5. Как лучше располагать провод при демонстрации опыта Эрстеда: в направлении север — юг или восток — запад?
6. Как взаимодействуют параллельные проводники с токами?
7. Как взаимодействуют катушки с токами?
8. В чем состоит гипотеза Ампера?
- 9*. Имеются два одинаковых по виду железных бруска, но один из них намагничен, а другой — нет. Как определить, какой брусок намагничен?
- 10*. Имеется кусок стальной проволоки. Как определить, намагничена ли проволока, если никаких других металлических предметов под рукой нет?
- 11*. В какую сторону показывает северный полюс магнитной стрелки, расположенной точно на Северном географическом полюсе Земли?

1. Магнитное поле
2. Магнитная индукция
3. Сила Ампера и сила Лоренца
4. Линии магнитной индукции

Магнитные взаимодействия осуществляются посредством магнитного поля. Основной характеристикой этого поля является магнитная индукция.

Мы расскажем о графическом представлении магнитного поля с помощью линий магнитной индукции и рассмотрим силы, действующие со стороны магнитного поля на проводник с током и на движущуюся заряженную частицу.

1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное взаимодействие, так же как и электрическое, осуществляется посредством поля.

Движущиеся заряженные частицы (проводники с током) создают вокруг себя магнитное поле, которое действует на другие движущиеся заряженные частицы (проводники с токами).

Существенное различие между электрическим и магнитным полем состоит в следующем. Электрическое поле создается как покоящимися, так и движущимися заряженными частицами и действует оно как на покоящиеся, так и на движущиеся заряженные частицы. Магнитное же поле создается только *движущимися* заряженными частицами и действует оно только на *движущиеся* заряженные частицы.

Но покой и движение относительны: в одной системе отсчета тело может покоиться, а в другой — двигаться. Поэтому *одна и та же* заряженная частица в одной системе отсчета может создавать только электрическое поле, а в другой — и электрическое, и магнитное. Это указывает на то, что между электрическим и магнитным полями существует глубокая взаимосвязь.

И действительно, как мы увидим в *Главе 3. Электромагнитное поле*, электрическое и магнитное поля являются частными случаями единого *электромагнитного* поля. Мы увидим также, что движущиеся заряды — не единственный «источник» магнитного поля: оно создается также изменяющимся во времени электрическим полем.

2. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Для магнитного поля, так же как и для электрического, вводят векторную величину, характеризующую это поле в каждой точке. Ее называют *магнитной индукцией* и обозначают $\vec{B}$.

Направление магнитной индукции

Как вы уже знаете, магнит и проводник с током оказывают *ориентирующее* действие на магнитную стрелку (см. § 6. *Взаимодействие магнитов и токов*). Это можно использовать для того, чтобы определить *направление* магнитной индукции.

За направление магнитной индукции в данной точке принимают направление, на которое указывает северный полюс свободно вращающейся магнитной стрелки, расположенной вблизи данной точки (рис. 7.1).

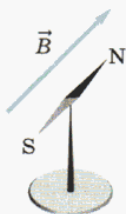


Рис. 7.1. Определение направления вектора магнитной индукции с помощью магнитной стрелки

Модуль магнитной индукции

Количественной характеристикой магнитного поля может служить сила, действующая в этом поле на проводник с током: чем сильнее поле, тем больше эта сила.

Опыт показывает, однако, что эта сила зависит не только от поля, но и от величин, характеризующих проводник с током: силы тока I в проводнике, длины проводника l и угла α между проводником и вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

При заданных силе тока и длине проводника сила F , действующая со стороны магнитного поля на проводник с током, *максимальна*, когда проводник расположен *перпендикулярно* вектору магнитной индукции.

Поэтому именно такое расположение проводника с током удобно выбрать для определения модуля магнитной индукции.

Опыты показывают, что сила, действующая в магнитном поле на проводник с током, прямо пропорциональна произведению силы тока на длину проводника, то есть выражению Il .

Значит, отношение $\frac{F}{Il}$ не зависит ни от силы тока в проводнике, ни от длины этого проводника и, следовательно, характери-

зует само *магнитное поле*. Поэтому это отношение выбрали для определения модуля магнитной индукции.

Итак,

модуль магнитной индукции в данной точке равен отношению силы, действующей на проводник с током, расположенный вблизи данной точки перпендикулярно вектору магнитной индукции, к произведению силы тока в проводнике и длины проводника: $B = \frac{F}{Il}$.

Единица магнитной индукции

За единицу магнитной индукции в системе СИ принимают магнитную индукцию поля, действующего с силой 1 Н на проводник длиной 1 м, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, если сила тока в проводнике равна 1 А.

Эта единица магнитной индукции называется *тесла* (Тл) в честь сербо-американского ученого Николы Тесла.

В соответствии с определением $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$.

3. СИЛА АМПЕРА И СИЛА ЛОРЕНЦА

СИЛА АМПЕРА

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется *силой Ампера*. Будем обозначать ее F_A .

Модуль силы Ампера

Из определения модуля магнитной индукции следует, что если проводник расположен в магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции, $B = \frac{F_A}{Il}$, то есть в этом случае мо-

дуль силы Ампера $F_A = IlB$, где I — сила тока в проводнике, l — длина проводника, B — модуль вектора магнитной индукции.

Как показывает опыт, в общем случае $F_A = IlB \sin \alpha$, где α — угол между проводником и вектором магнитной индукции.

Направление силы Ампера

Опыт показывает, что *сила Ампера перпендикулярна как направлению магнитной индукции, так и направлению тока в проводнике*.

В случае когда проводник с током расположен перпендикулярно вектору магнитной индукции, направление силы Ампера можно найти по правилу левой руки (рис. 7.2).

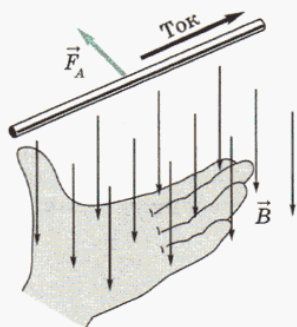


Рис. 7.2. Правило левой руки: если раскрытую ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля

Как магнитное поле действует на рамку с током?

Мы уже знаем, что магнитное поле оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку. Покажем, что сходное действие магнитное поле оказывает и на рамку с током.

На рис. 7.3 изображены силы, действующие на стороны рамки, когда плоскость рамки параллельна вектору магнитной индукции. Мы видим, что эти силы действительно стремятся повернуть рамку.

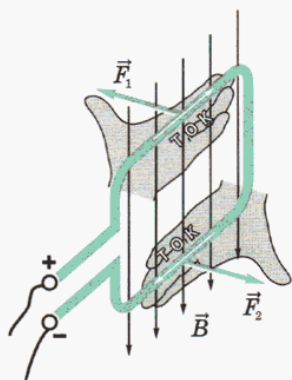


Рис. 7.3. Ориентирующее действие магнитного поля на рамку с током. Применяя правило левой руки, находим, что силы, действующие на противоположные стороны рамки, стремятся повернуть ее так, чтобы плоскость рамки была перпендикулярной вектору магнитной индукции

Применение силы Ампера

Ориентирующее (поворачивающее) действие магнитного поля на рамку с током используют для измерения магнитного поля, а также в электродвигателе.

Для усиления вращающего эффекта в электродвигателях обычно помещают много рамок.

СИЛА ЛОРЕНЦА

Магнитное поле действует на проводник с током потому, что оно действует на движущиеся заряженные частицы в этом проводнике.

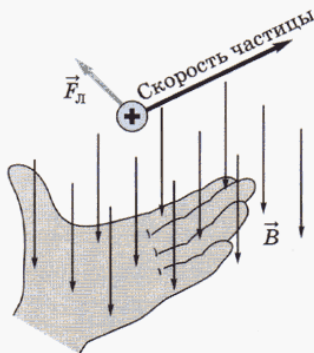
Силу, действующую со стороны магнитного поля на заряженную частицу, называют *силой Лоренца*¹.

Направление силы Лоренца, действующей на *положительно* заряженную частицу, находят с помощью того же правила, что и направление силы Ампера, то есть правила левой руки (рис. 7.4). Это связано с тем, что за направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

На отрицательно заряженные частицы, движущиеся в том же направлении, что и положительные, сила Лоренца действует в противоположном направлении, поэтому при движении в магнитном поле положительно и отрицательно заряженные частицы поворачивают в *противоположные* стороны.

Это используют, например, для определения электрического заряда частиц, вылетающих при распадах атомных ядер (см. § 25. *Радиоактивность*).

Рис. 7.4. Направление силы Лоренца: если раскрытую ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление скорости положительно заряженной частицы, то отогнутый в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на частицу



Расчеты показывают, что *модуль силы Лоренца* $F_L = qvB \sin \alpha$, где q — модуль заряда частицы, v — модуль ее скорости, B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между скоростью частицы и вектором магнитной индукции.

Сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости частицы и вектору магнитной индукции. Поэтому если частица влетает в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции, то под действием силы Лоренца она будет двигаться *по окружности* в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{B}$.

При этом сила Лоренца играет роль центростремительной силы, поэтому $\frac{mv^2}{R} = qvB$, где R — радиус окружности. Отсюда $R = \frac{mv}{qB}$.

¹ В честь голландского физика Х. Лоренца, изучавшего движение заряженных частиц в электрическом и магнитном поле.

4. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Для графического представления магнитного поля используют **линии магнитной индукции** — воображаемые линии, касательные к которым показывают направление вектора магнитной индукции в каждой точке.

Линии магнитной индукции проводят так, что их густота пропорциональна модулю магнитной индукции.

ПРИМЕРЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

На рис. 7.5—7.7 изображены линии магнитной индукции для наиболее характерных случаев. Для наглядности вдоль некоторых линий расположены магнитные стрелки.

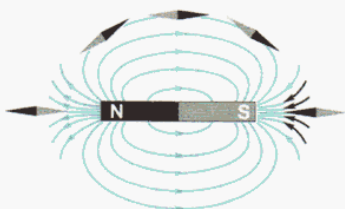


Рис. 7.5. Линии магнитной индукции полосового магнита

Магнитная индукция особенно велика вблизи полюсов магнита, где густота линий магнитной индукции наибольшая.

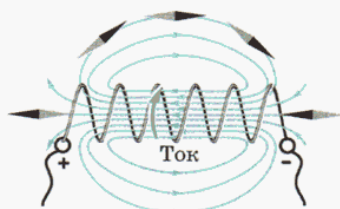


Рис. 7.6. Линии магнитной индукции катушки с током

Вне катушки ее магнитное поле сходно с полем полосового магнита. Внутри катушки магнитное поле практически однородно.

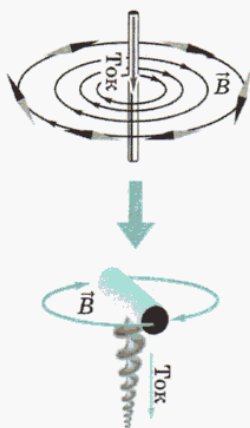


Рис. 7.7. Линии магнитной индукции прямолинейного проводника с током имеют вид concentric окружностей

Направление линий магнитной индукции можно определить с помощью *правила буравчика*: если вращать буравчик так, чтобы направление его поступательного движения совпало с направлением тока, то направление вращения ручки буравчика покажет направление линий магнитной индукции.

Поскольку магнитных зарядов не существует, *линии магнитной индукции всегда замкнуты*¹.

МОЖНО ЛИ «УВИДЕТЬ» ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ?

Линии магнитной индукции (так же как и линии напряженности электрического поля) являются воображаемыми линиями, и поэтому увидеть их непосредственно нельзя.

Однако для того, чтобы представить форму линий магнитной индукции, можно воспользоваться приемом, сходным с тем, какой мы использовали для визуализации линий напряженности электрического поля. Напомним, что там мы воспользовались тем, что мелкие продолговатые частицы ориентируются вдоль линий напряженности, делая эти линии как бы видимыми.

Сходная картина наблюдается в случае, если поместить в магнитное поле небольшие продолговатые железные предметы — например, опилки. Они намагничиваются в магнитном поле, превращаясь в маленькие магнитные стрелки.

А эти крошечные стрелки ориентируются вдоль линий магнитной индукции, делая их как бы видимыми.

На рис. 7.8 изображены полученные в таких опытах «картины» магнитного поля полосового магнита и прямолинейного проводника с током. Подобные опыты первым поставил Фарадей.

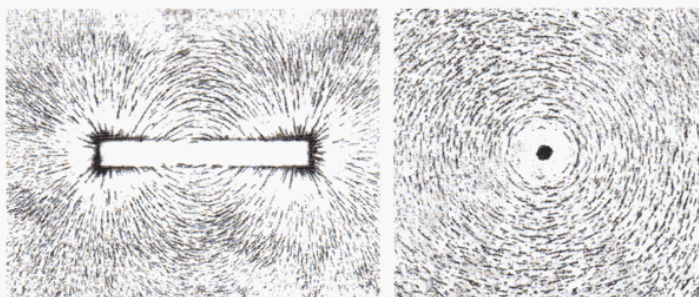


Рис. 7.8. Визуализация линий магнитной индукции поля полосового магнита и прямолинейного проводника с током (проводник перпендикулярен плоскости рисунка)

Сравните эти фотографии со схематическими изображениями полей, приведенными на рис. 7.5—7.7.

¹ Глядя на рис. 7.5, можно подумать, что линии магнитной индукции начинаются и заканчиваются на поверхности магнита, но на самом деле часть этих линий просто проходит *внутри* магнита (сравните их с замкнутыми линиями магнитной индукции катушки с током на рис. 7.6).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы основные свойства магнитного поля?
2. Что такое магнитная индукция?
3. Как определяют направление магнитной индукции?
4. Как определяют модуль магнитной индукции?
5. Что такое сила Ампера? Чему она равна?
6. Как найти направление силы Ампера?
7. Как магнитное поле действует на рамку с током? Где используется это явление?
8. Что такое сила Лоренца? Как определить ее направление и модуль?
9. Что такое линии магнитной индукции?
10. Начертите в тетради линии магнитной индукции полосового магнита, катушки с током, прямолинейного проводника с током.
- 11*. Сравните электрическое и магнитное взаимодействия. Что у них общего и чем они отличаются?
- 12*. По проводнику течет ток. При этом средняя скорость направленного движения электронов обычно меньше миллиметра в секунду. Значит ли это, что, если двигаться с такой скоростью вдоль проводника с током, мы не сможем обнаружить магнитное поле?

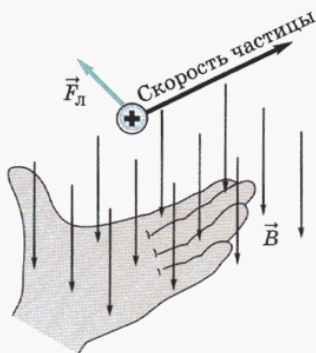
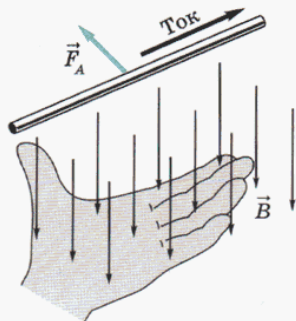


ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Магнитными взаимодействиями** называют взаимодействия между движущимися электрическими зарядами (или проводниками с током).
- **Взаимодействие параллельных проводников с токами:** если по проводникам текут токи в одном направлении, эти проводники притягиваются, а если в противоположных — то отталкиваются.
- **Гипотеза Ампера:** все магнитные взаимодействия обусловлены взаимодействием электрических токов.
- Магнитное взаимодействие осуществляется посредством **магнитного поля**: движущиеся заряженные частицы (проводники, по которым текут токи) создают вокруг себя магнитное

поле, которое действует на другие движущиеся заряженные частицы (проводники с токами).

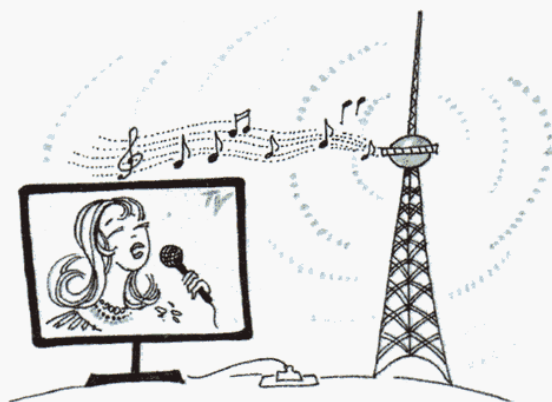
- Основной характеристикой магнитного поля в данной точке является *магнитная индукция*.
- За *направление магнитной индукции* принимают направление, на которое указывает северный полюс свободно вращающейся магнитной стрелки.
- *Модуль магнитной индукции* равен отношению силы, действующей на проводник с током, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, к произведению силы тока в проводнике и длины проводника: $B = \frac{F}{Il}$.
- Силу, действующую на проводник с током в магнитном поле, называют *силой Ампера*.
- *Направление силы Ампера* определяется по *правилу левой руки*.
- *Модуль силы Ампера* $F_A = IlB \sin \alpha$, где I — сила тока в проводнике, l — длина проводника, B — модуль магнитной индукции, α — угол между проводником и вектором магнитной индукции.
- Силу, действующую на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, называют *силой Лоренца*.
- *Направление силы Лоренца*, действующей на положительно заряженную частицу, определяют с помощью *правила левой руки*.



- **Модуль силы Лоренца** $F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$, где q — модуль заряда частицы, v — модуль ее скорости, B — модуль магнитной индукции, α — угол между скоростью частицы и вектором магнитной индукции.
- **Линии магнитной индукции** — это воображаемые линии, касательные к которым показывают направление вектора магнитной индукции в каждой точке. Густота линий магнитной индукции пропорциональна модулю магнитной индукции.

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ



В первой половине 19-го века английский ученый Майкл Фарадей открыл явление электромагнитной индукции, на котором основано действие генераторов электрического тока на электростанциях. Мы расскажем также о производстве и передаче электроэнергии.

Теорию электромагнитных явлений построил английский физик Джеймс Клерк Максвелл. При этом он предсказал существование электромагнитных волн, ставших основой радио и телевидения. Максвелл предположил, что свет представляет собой электромагнитные волны. На опыте факт существования электромагнитных волн установил немецкий физик Генрих Герц.

§ 8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

1. Явление электромагнитной индукции
2. Закон электромагнитной индукции

Мы расскажем здесь об опытах Майкла Фарадея, в которых было открыто явление электромагнитной индукции.

Мы рассмотрим также причины возникновения индукционного тока и сформулируем закон электромагнитной индукции.

1. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



Майкл Фарадей
(1791—1867)

Как вы уже знаете, Эрстед и Ампер в своих опытах установили, что проводник с током создает вокруг себя магнитное поле и испытывает действие магнитного поля (см. § 6. *Взаимодействие магнитов и токов*).

В связи с этим возник вопрос: можно ли создать электрический ток с помощью магнитного поля? В течение долгого времени этого сделать не удавалось: например, проводник помещали в сильное магнитное поле, но ток в проводнике не возникал.

«Превратить магнетизм в электричество»¹ сумел Майкл Фарадей в 1831 году, после десяти лет упорных поисков.

ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ

«Старые куски проволоки, дерева и железа кажутся ему достаточными для того, чтобы делать великие открытия», — так отзывался о посещении лаборатории Фарадея известный немецкий физик Герман Гельмгольц. Но Фарадею этого действительно оказалось достаточно. И поэтому повторить ставшие знаменитыми опыты Фарадея сегодня может каждый.

Возникновение тока при относительном движении катушки и магнита

Фарадей догадался, что для возникновения тока в проводнике, находящемся в магнитном поле, необходимо *изменять во времени* либо магнитное поле, либо положение проводника.

¹ Так сформулировал поставленную перед собой задачу Майкл Фарадей в записной книжке.

Соединим концы проволоочной катушки с миллиамперметром. Если теперь вдвигать в катушку магнит, как показано на рис. 8.1, а, мы увидим, что в катушке возникает ток. Этот ток называли *индукционным*¹. При выдвигании магнита из катушки также возникает ток, причем его направление изменяется на противоположное.

Ток в катушке возникает и тогда, когда ее надевают на неподвижный магнит или снимают с него (рис. 8.1, б).

Таким образом, индукционный ток в катушке возникает при движении магнита и катушки *относительно друг друга*.

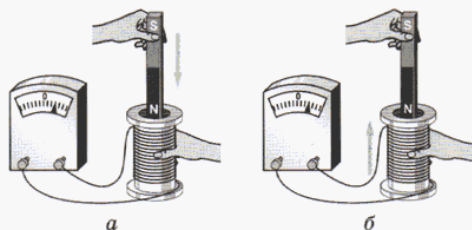


Рис. 8.1. Возникновение индукционного тока в катушке при движении магнита и катушки относительно друг друга

Возникновение тока в одной катушке при изменении тока в другой катушке

Наденем теперь две катушки на общий железный сердечник и соединим одну катушку (через реостат) с источником тока, а другую — с миллиамперметром (рис. 8.2).

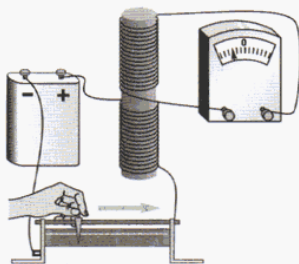


Рис. 8.2. Возникновение индукционного тока в катушке при изменении тока в другой катушке

Силу тока в первой катушке можно изменять, перемещая ползунок реостата. Мы увидим, что при *изменении* силы тока в первой катушке возникает индукционный ток во второй катушке.

¹ От латинского *induction* — наведение.

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

В описанных опытах Фарадей заметил общую закономерность: индукционный ток в катушке возникает *при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих катушку*.

Чтобы точнее сформулировать эту закономерность, введем понятие *магнитного потока* (или потока магнитной индукции) через контур как физической величины, пропорциональной числу линий магнитной индукции, пронизывающих этот контур.

Если плоскость контура перпендикулярна вектору магнитной индукции, то магнитный поток равен BS , где B — модуль магнитной индукции, S — площадь контура (рис. 8.3). При повороте контура число пронизывающих его линий уменьшается: оно пропорционально $\cos \alpha$, где α — угол между вектором магнитной индукции и перпендикуляром к плоскости контура (рис. 8.4). Поэтому в общем случае

магнитный поток (поток магнитной индукции) через замкнутый контур $\Phi = BS \cos \alpha$.

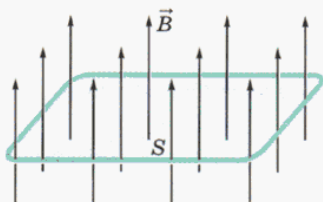


Рис. 8.3. Когда плоскость контура перпендикулярна вектору магнитной индукции, магнитный поток через контур равен произведению BS

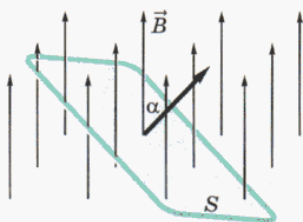


Рис. 8.4. Число пронизывающих контур линий магнитной индукции пропорционально $\cos \alpha$, где α — угол между вектором магнитной индукции и перпендикуляром к плоскости контура

Единица магнитного потока

Единицу магнитного потока в системе СИ называют *вебер* (Вб) в честь немецкого физика Вильгельма Вебера. Если замкнутый контур площадью 1 м^2 расположен перпендикулярно вектору маг-

нитной индукции, модуль которого 1 Тл, то магнитный поток через этот контур равен 1 Вб. Поэтому $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Открытое Фарадеем явление, то есть возникновение электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока через ограниченную контуром площадь, называют *явлением электромагнитной индукции*.

Основной вывод из опытов Фарадея состоит в том, что

индукционный ток в замкнутом контуре возникает при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

Когда Фарадей показал на лекции свои опыты, одна из слушательниц спросила ученого: «А какая может быть польза от этого слабого тока, который возникает в катушке?» — «А какая может быть польза от новорожденного?» — ответил ей Фарадей вопросом на вопрос.

Но даже он сам, наверное, не подозревал тогда, каким гигантом станет его «новорожденный»: ведь именно явление электромагнитной индукции лежит в основе действия генераторов электрического тока на всех электростанциях земного шара (см. § 10. *Производство, передача и потребление электроэнергии*).

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Существует две причины возникновения индукционного тока. С одной из них вы уже знакомы, а вторая связана с новым для вас явлением.

Возникновение индукционного тока при движении контура в магнитном поле

Рассмотрим сначала случай, когда индукционный ток возникает при движении замкнутого контура или его частей в *постоянном* магнитном поле (как, например, при надевании катушки на магнит — см. рис. 8.1, б).

Индукционный ток возникает только при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, поэтому в случае постоянного магнитного поля индукционный ток возникает только при таком движении контура, когда какая-то его часть *пересекает* линии магнитной индукции.

Пусть один из проводников, составляющих контур, перпендикулярен вектору магнитной индукции, а скорость этого провод-

ника перпендикулярна как проводнику, так и вектору магнитной индукции (рис. 8.5).

Сила Лоренца,
вызывающая
индукционный ток

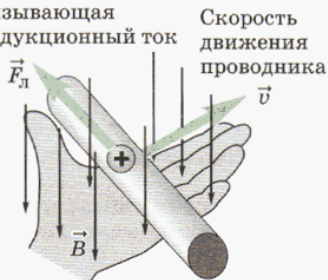


Рис. 8.5. Возникновение индукционного тока в движущемся проводнике (на рисунке изображена только часть замкнутого контура)

Проводник при своем движении пересекает линии магнитной индукции.

Свободные заряды в проводнике движутся вместе с ним, а мы уже знаем, что на движущиеся заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца (см. § 7. Магнитное поле).

Направление силы Лоренца, действующей на положительные заряды¹, движущиеся в магнитном поле, можно найти с помощью правила левой руки (см. § 13. Магнитное поле).

В данном случае, как мы видим, сила Лоренца направлена вдоль проводника. Она-то и вызывает индукционный ток.

Возникновение индукционного тока в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле

Рассмотрим теперь возникновение индукционного тока в *неподвижном* контуре (как, например, при вдвигании магнита в катушку — см. рис. 8.1, а).

В этом случае изменение магнитного потока через контур может происходить только при условии, что магнитное поле, в котором находится контур, *изменяется во времени*.

Например, если к неподвижному проводящему кольцу приближать магнит, то пронизывающий кольцо магнитный поток будет увеличиваться, вследствие чего в кольце возникнет индукционный ток (рис. 8.6).

Возникновение индукционного тока в *неподвижном* проводнике нельзя объяснить действием силы Лоренца на свободные заряды: ведь эта сила действует только на *движущиеся* электрические заряды, а средняя скорость заряженных частиц в неподвижном проводнике равна нулю.

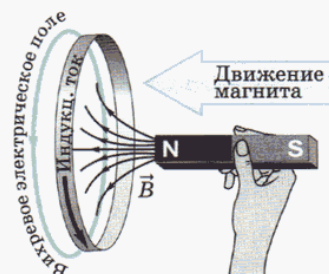
¹ Напомним, что за направление тока условно выбрано направление движения *положительно* заряженных частиц, поэтому для определения направления индукционного тока надо найти направление силы, действующей на положительные заряды.

Значит, возникновение индукционного тока в неподвижном проводнике можно объяснить только тем, что на свободные заряды действует сила со стороны электрического поля.

Следовательно, *переменное магнитное поле порождает электрическое поле.*

Рис. 8.6. Возникновение индукционного тока в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле

На рисунке показана замкнутая линия напряженности вихревого электрического поля, создаваемого переменным магнитным полем.



ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Главное отличие электрического поля, порожденного переменным магнитным полем, от уже знакомого вам электростатического поля (создаваемого покоящимися зарядами) заключается в следующем.

Линии напряженности электростатического поля начинаются и заканчиваются только на электрических зарядах и не могут быть замкнутыми, а линии электрического поля, созданного переменным магнитным полем, наоборот, всегда *замкнуты* (подобно линиям магнитной индукции). На рис. 8.6 изображена одна из линий напряженности вихревого электрического поля.

Электрическое поле, созданное переменным магнитным полем, называют *вихревым*.

Вихревое электрическое поле возникает при изменении магнитного поля *всегда* — независимо от того, есть ли в этом месте пространства замкнутый проводящий контур или нет. Но если такой контур в этом месте пространства есть, то в контуре возникает индукционный ток.

При перемещении заряда по замкнутому контуру вихревое электрическое поле, в отличие от электростатического поля, совершает над зарядом работу.

2. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Если в замкнутом контуре возникает индукционный ток, значит, на свободные заряды в этом контуре действуют *сторонние силы* (см. § 5. Закон Ома для полной цепи).

Сторонние силы характеризуются электродвижущей силой (ЭДС), численно равной работе, совершаемой ими при перемеще-

нии единичного положительного заряда. В случае индукционного тока эта электродвижущая сила называется ЭДС индукции. ЭДС индукции обозначают обычно $\mathcal{E}_i$.

Используя закон Ома для полной цепи, получаем $\mathcal{E}_i = I_i R$, где I_i — сила индукционного тока, R — полное сопротивление замкнутого контура. Используя это соотношение, Фарадей установил на опыте

закон электромагнитной индукции: ЭДС индукции в замкнутом контуре равна модулю скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур: $\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$.

Направление индукционного тока и связанное с ним уточнение формулы для закона электромагнитной индукции мы рассмотрим в следующем параграфе.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите опыты Фарадея, в которых было открыто явление электромагнитной индукции.
2. Какой вывод сделал Фарадей из своих опытов?
3. Что такое магнитный поток?
4. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
5. Какова причина возникновения индукционного тока при движении контура в постоянном магнитном поле?
6. Какова причина возникновения индукционного тока в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле?
7. Что такое вихревое электрическое поле? Чем оно отличается от электростатического поля?
8. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
- 9*. Плоскость замкнутой жесткой проволоочной рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции однородного магнитного поля. Рамку перемещают в направлении, перпендикулярном плоскости рамки. Будет ли в рамке индуцироваться ток?

1. Правило Ленца
2. Явление самоиндукции
3. Энергия магнитного поля

Направление индукционного тока можно определить с помощью правила Ленца, которое является одним из следствий закона сохранения энергии.

Мы расскажем также о явлении самоиндукции и об энергии магнитного поля.

1. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Чтобы определить направление индукционного тока, возникающего в проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, поставим следующий опыт.

Будем *приближать* магнит к алюминиевому кольцу, закрепленному на свободно вращающемся стержне (рис. 9.1).

Мы увидим, что кольцо при этом *отталкивается* от магнита.

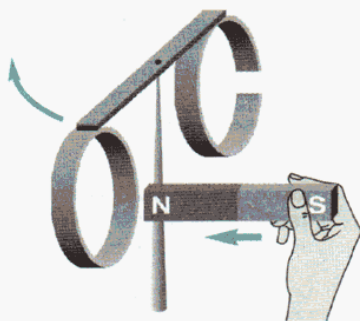


Рис. 9.1. При приближении магнита к проводящему кольцу в кольце возникает индукционный ток такого направления, что кольцо начинает отталкиваться от магнита

Если же приближать магнит к такому же, но *разрезанному* кольцу (изображенному на рис. 9.1 справа), кольцо останется в покое.

В чем же причина этих эффектов?

Раз сплошное кольцо взаимодействует с магнитом, значит, в этом кольце идет *ток*. И понятно, почему он возник: при приближении магнита увеличивается поток магнитной индукции, пронизывающий кольцо, а это порождает индукционный ток.

Понятно также, почему не взаимодействует с магнитом разрезанное кольцо: из-за разреза в нем просто не может идти ток.

Выясним теперь, почему направление индукционного тока в кольце таково, что кольцо *отталкивается* от магнита?

Ответ на этот вопрос дает *закон сохранения энергии*.

Если кольцо отталкивается от магнита, то и магнит отталкивается от кольца (по третьему закону Ньютона). Следовательно, приближая магнит к кольцу, мы *совершаем положительную работу*, то есть затрачиваем энергию. Эта энергия превращается в *энергию магнитного поля* индукционного тока.

Закон сохранения энергии помогает найти ответ и на вопрос: как направлена магнитная индукция возникшего тока?

Заметим, что при приближении магнита к кольцу магнитная индукция внутри кольца *увеличивается*. Если индукция магнитного поля тока в кольце была бы направлена в ту же сторону, что индукция магнитного поля магнита, то общее изменение магнитного потока через кольцо увеличилось бы еще больше, вследствие чего еще больше возросла бы сила индукционного тока.

Это привело бы к новому увеличению магнитного потока, а вместе с ним к еще большему возрастанию силы тока. Но такое «беспричинное» возрастание индукционного тока и магнитного поля явно противоречило бы закону сохранения энергии.

Итак, мы приходим к выводу, что магнитное поле индукционного тока *ослабляет изменение* магнитного поля магнита.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Общую закономерность, проявляющуюся в рассмотренных выше и других подобных им опытах, установил российский физик Эмилий Христианович Ленц, поэтому ее называют *правилом Ленца*. Оно гласит:

индукционный ток всегда имеет такое направление, что созданное им магнитное поле стремится скомпенсировать изменение магнитного потока, которое вызвало данный ток.

С учетом правила Ленца закон электромагнитной индукции записывают в виде $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Знак «минус» в этой формуле как раз и свидетельствует о «противодействии», оказываемом индукционным током его изменению.

Как правило Ленца может «победить» силу тяжести

Опишем очень эффектную демонстрацию правила Ленца.

Если поместить магнитик над «сверхпроводящей чашей», то есть чашей, сделанной из вещества, которое в условиях опыта

находится в сверхпроводящем состоянии, магнит будет парить над чашей как бы в состоянии невесомости (рис. 9.2).

Рис. 9.2. Магнит зависает над чашей из сверхпроводника



Объяснение этого красивого опыта заключается в следующем.

Как только магнит начинает падать, его магнитное поле становится переменным (зависящим от времени), а переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. В сверхпроводящей чаше это поле действует на свободные заряды, порождая кольцевые индукционные токи. И согласно правилу Ленца эти токи направлены так, что создаваемое ими магнитное поле *отталкивает* магнит.

Электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю, вследствие чего индукционные токи в сверхпроводнике не затухают со временем. Поэтому созданное ими магнитное поле будет постоянно отталкивать магнит, компенсируя действующую на него силу тяжести. В результате магнит и зависает над чашей.

Правило Ленца и закон сохранения энергии

Как мы видели, *правило Ленца является следствием закона сохранения энергии.*

Заметим, однако, что Ленц установил свое правило *до* открытия закона сохранения энергии. И поэтому оно явилось одним из шагов на пути к открытию общего закона сохранения энергии.

2. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

При рассмотрении правила Ленца мы видели, что замкнутый контур проявляет как бы свойство инертности, противодействуя изменению магнитного потока, пронизывающего этот контур.

Это же свойство инертности проявляется и при изменении силы тока в замкнутом контуре. Действительно, при изменении силы тока изменяется создаваемое им магнитное поле и, следовательно, изменяется магнитный поток этого поля через данный контур. А *всякое* изменение магнитного потока через замкнутый контур порождает ЭДС индукции.

Возникновение ЭДС индукции в контуре при изменении силы тока в этом же самом контуре называют явлением самоиндукции.

А ЭДС индукции называется в данном случае *ЭДС самоиндукции*.

Поставим опыт

Соберем цепь, содержащую источник тока, лампу и катушку с достаточным большим числом витков.

Если замкнуть ключ, мы увидим, что накал лампы увеличивается постепенно (рис. 9.3, а). Это означает, что сила тока в цепи нарастает *постепенно* (рис. 9.3, б).

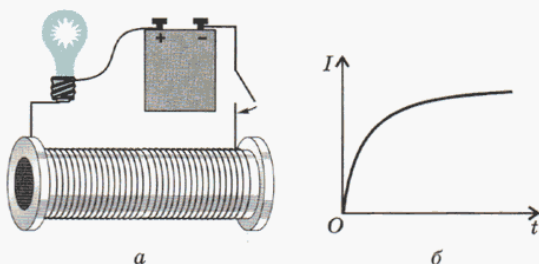


Рис. 9.3. При замыкании цепи (а) сила тока в цепи нарастает постепенно (б)

Причина такого постепенного нарастания силы тока как раз и состоит в явлении *самоиндукции*: при возрастании тока в контуре возникает ЭДС индукции, которая противодействует изменению тока.

Физической причиной самоиндукции является порождение вихревого электрического поля переменным магнитным полем.

Например, в рассмотренном выше опыте при увеличении силы тока в контуре увеличивается создаваемое этим током магнитное поле. Вследствие этого возникает вихревое электрическое поле, которое, согласно правилу Ленца, «тормозит» нарастание тока.

ИНДУКТИВНОСТЬ

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, где Φ — магнитный поток, созданный магнитным полем индукционного тока в контуре.

Этот магнитный поток пропорционален силе тока I в контуре: $\Phi = LI$. Коэффициент пропорциональности L называют *индуктивностью* данного контура.

Индуктивность контура определяется его формой и размерами (в частности, числом витков в катушке), а также свойствами материала, находящегося внутри контура (так называемого сердечника). Так, использование железного сердечника увеличивает индуктивность контура в тысячи раз; сердечники из некоторых сплавов увеличивают индуктивность в сотни тысяч раз.

Поскольку $\Phi = LI$, из формулы $\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ получаем, что $\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Эта формула раскрывает физический смысл индуктивности: из нее следует, что индуктивность контура численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с. Поэтому индуктивность называют также коэффициентом самоиндукции.

Единица индуктивности

В системе СИ единицей индуктивности является *генри* (Гн). Она названа в честь американского физика Джозефа Генри, наблюдавшего впервые явление самоиндукции в 1832 году.

Индуктивность контура равна 1 Гн, если при изменении силы тока в контуре на 1 А за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В. Отсюда $1 \text{ Гн} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$.

3. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вы уже знаете, что магнитное поле, так же как и электрическое, обладает энергией.

Вывод формулы для энергии магнитного поля выходит за рамки нашего курса, поэтому мы ограничимся пояснениями, основанными на механической аналогии.

Роль массы m , характеризующей инертные свойства тела, в случае катушки с током играет индуктивность L . Естественно предположить, что роль скорости v играет сила тока I .

Поскольку кинетическая энергия тела равна $\frac{mv^2}{2}$, по аналогии получаем, что

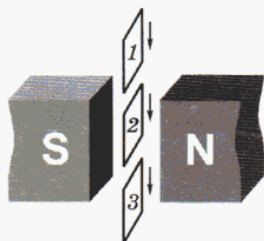
энергия магнитного поля тока в контуре с индуктивностью L равна $W_m = \frac{LI^2}{2}$, где I — сила тока в контуре.

Именно такое выражение для энергии магнитного поля тока и получается в результате расчетов.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему замкнутое металлическое кольцо отталкивается от приближающегося к нему магнита, а разрезанное кольцо не взаимодействует с магнитом?
2. Почему при приближении магнита к замкнутому металлическому кольцу оно отталкивается от магнита, а при удалении магнита от кольца оно притягивается к магниту?
3. Как изменяется энергия магнитного поля при приближении магнита к замкнутому металлическому кольцу — увеличивается или уменьшается?
4. Сформулируйте правило Ленца.
5. Приведите примеры применения правила Ленца.
6. Как связано правило Ленца с законом сохранения энергии? Приведите примеры, поясняющие ваш ответ.
7. В чем состоит явление самоиндукции?
8. Чем обусловлено явление самоиндукции?
9. Почему нельзя мгновенно изменить силу тока в катушке?
10. Что такое индуктивность?
11. Какова единица индуктивности?
- 12*. опыты показывают, что индуктивность катушки увеличивается с увеличением числа витков в катушке. Можете ли вы это объяснить?
- 13*. Две катушки надели на один сердечник. Силу тока в первой катушке постепенно увеличивают. Возникнет ли ток во второй катушке, если она замкнута? Если да, то каким будет направление тока во второй катушке — таким же, как в первой, или противоположным ему? Обоснуйте свой ответ.
- 14*. Чему равна энергия магнитного поля в контуре с током?
- 15*. Замкнутый контур вносят в область магнитного поля. Будет ли контур втягиваться в поле или выталкиваться из него? Какие преобразования энергии будут при этом происходить?
- 16*. На рисунке показаны три последовательных положения проводочной рамки, падающей между полюсами магнита. Как направ-



лен индукционный ток в рамке при прохождении ею положений 1, 2, 3? Как направлены силы, действующие на рамку со стороны магнитного поля магнита?

17*. Магнит удаляют от проводящего кольца, причем магнит обращен к кольцу южным полюсом. Как будет направлен индукционный ток в кольце, если смотреть на него со стороны магнита, — по часовой стрелке или против?

§ 10. ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

1. Производство электроэнергии
2. Передача и потребление электроэнергии

Огромным достоинством электроэнергии является то, что ее можно передавать на большие расстояния и преобразовывать в другие виды энергии: механическую, внутреннюю, световую.

Мы расскажем о принципе действия генератора электрического тока и о том, какое воздействие на окружающую среду оказывает работа больших электростанций.

1. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ГДЕ ПРОИЗВОДЯТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ?

Электроэнергию производят сегодня в основном на электростанциях трех типов: *тепловых, атомных и гидроэлектростанциях* (рис. 10.1).

Рис. 10.1. Доли различных типов электростанций в мировом производстве электроэнергии



Расскажем кратко о принципах действия каждого типа электростанций.

На тепловых электростанциях с помощью тепловых двигателей (обычно паровых турбин) внутреннюю энергию топлива (нефти, газа, угля) преобразуют в механическую энергию. А затем механическую энергию преобразуют в электрическую с помощью *генераторов*, действие которых основано на явлении электромагнитной индукции.

На атомных электростанциях энергию, которая выделяется в атомных реакторах при делении атомных ядер (например, урана), преобразуют также с помощью тепловых двигателей в механическую энергию, после чего механическую энергию преобразуют

в электрическую с помощью генераторов. О принципах действия атомных реакторов мы расскажем в § 27. *Ядерная энергетика.*

На гидроэлектростанциях механическую энергию падающей воды с помощью генераторов преобразуют в электрическую энергию.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Действие генератора электрического тока основано на явлении *электромагнитной индукции*.

Основным элементом генератора электрического тока является рамка, которую вращают в магнитном поле. При этом пронизывающий рамку магнитный поток изменяется во времени, вследствие чего в рамке возникает индукционный ток (рис. 10.2).

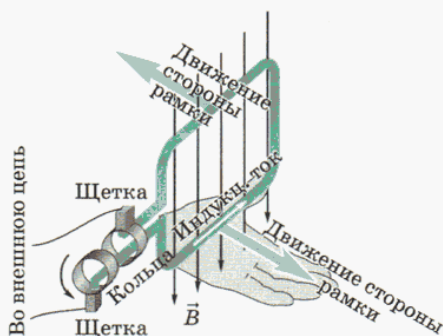


Рис. 10.2. Принцип действия генератора переменного тока

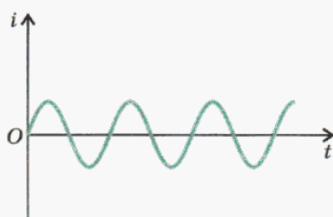


Рис. 10.3. Зависимость силы тока от времени для переменного тока

При равномерном вращении в рамке индуцируется *переменный* электрический ток: сила тока изменяется по синусоидальному закону (рис. 10.3).

Отрицательные значения силы тока соответствуют противоположному направлению тока.

Чтобы «снимать» с вращающейся рамки ток, не переключивая при этом проводов, используют скользящие контакты, называемые щетками (см. рис. 10.2).

Напряжение в сети переменного тока можно повышать и понижать практически без потерь с помощью трансформаторов. Как мы увидим ниже, без этого невозможно было бы передавать электроэнергию на большие расстояния.

Щетки обеспечивают, конечно, худший контакт, чем закрепленные проводники. Из-за большого сопротивления щетки нагреваются и, кроме того, вследствие трения стираются.

Поэтому в современных небольших генераторах электрического тока вращают не рамку, а постоянные магниты: при такой конструкции генератора скользящие контакты не нужны.

В промышленных генераторах на электростанциях вращают тоже не рамки, в которых индуцируется ток, а электромагниты. Ток к вращающимся электромагнитам приходится подводить с помощью скользящих контактов, но этот ток значительно меньше, чем индукционный ток в рамке.

ВОЗДЕЙСТВИЕ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Широкое применение электроэнергии повышает производительность труда и улучшает условия жизни, но, к сожалению, все крупные электростанции оказывают вредное воздействие на окружающую среду.

Тепловые электростанции загрязняют воздух продуктами сгорания топлива. Кроме того, на таких электростанциях работают тепловые двигатели огромной мощности, а для работы теплового двигателя, как вы уже знаете из курса физики 10-го класса, необходим холодильник. В качестве такового используется окружающая среда, что приводит к ее «тепловому загрязнению».

Атомные электростанции также становятся причиной теплового загрязнения окружающей среды, поскольку и в них используются тепловые двигатели. Кроме того, как показала практика, на атомных электростанциях существует опасность аварий, сопровождаемых выбросом радиоактивных веществ. Такие аварии происходили в разных странах мира в 70—80-х годах 20-го века, что заставило значительно повысить требования к уровню надежности атомных электростанций.

На гидроэлектростанциях происходит непосредственное превращение механической энергии в электрическую. Поэтому работа таких электростанций не сопровождается тепловым загрязнением. При этом нет также выбросов продуктов сгорания и опасности выброса радиоактивных веществ. Однако и при работе гидроэлектростанций окружающей среде наносится вред: чтобы создать необходимую для работы электростанции разность уровней воды, приходится строить на реках высокие плотины, что приводит к возникновению искусственных «морей», то есть затоплению огромных территорий, которые выводятся из землепользования.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Описанные выше экологические проблемы, а также ограниченность топливных ископаемых (по оценкам геологов, запасов нефти на Земле хватит не больше чем на сто лет) заставляют

ученых активно искать новые источники энергии (их называют *альтернативными*).

Опишем кратко эти источники энергии.

Использование солнечной энергии

Сегодня используют два способа преобразования солнечной энергии в электрическую.

Во-первых, энергию солнечного излучения можно непосредственно преобразовать в электроэнергию с помощью фотоэлементов, покрывающих достаточно большие площади. Такие солнечные батареи используют для энергообеспечения искусственных спутников, а также для бытовых целей в районах с жарким климатом.

Во-вторых, солнечную энергию можно концентрировать с помощью системы зеркал для подогрева воды и превращения ее в пар, давление которого приводит затем в движение генератор электрического тока.

К сожалению, стоимость получаемой таким образом электроэнергии остается пока слишком высокой для того, чтобы ее можно было использовать в больших масштабах.

Энергия термоядерного синтеза

Одной из главных надежд человечества на преодоление в будущем энергетического кризиса является использование реакций термоядерного синтеза. Так называют ядерные реакции, при которых происходит *объединение* атомных ядер при очень высокой температуре. О термоядерных реакциях мы расскажем в § 26. *Ядерные реакции и энергия связи ядер.*

Важное преимущество реакций термоядерного синтеза состоит в том, что запасы термоядерного топлива легкодоступны и практически неограниченны (они есть, например, в морской воде).

Кроме того, термоядерные реакции сопровождаются значительно меньшим выделением радиоактивных веществ: радиационная опасность, связанная с термоядерным реактором, примерно в миллион раз меньше опасности, связанной с использованием уранового реактора той же мощности.

Хотя термоядерный синтез считают одним из самых многообещающих способов получения энергии в будущем, сегодня этот способ находится еще на стадии экспериментальных исследований. Кроме того, он не решает проблему теплового загрязнения окружающей среды.

Приливная энергетика

Приливные электростанции работают по тому же принципу, что и гидроэлектростанции: в них используют перепад уровней воды, образующийся при морских приливах и отливах. Такие

электростанции уже существуют, но для их эффективной работы разность уровней воды при приливе и отливе должна составлять не менее 6 м.

К сожалению, на Земле не так много мест, где выполняется это условие, поэтому широкого применения приливная энергетика получить не может.

Ветроэнергетика

В некоторых странах (например, в Германии и Нидерландах) строят ветровые электростанции, являющиеся современным вариантом ветряных мельниц.

Они эффективны, однако только в тех областях, где дуют постоянные ветры достаточно большой силы.

2. ПЕРЕДАЧА И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Напряжение на выходе генераторов больших электростанций составляет обычно десятки тысяч вольт. Однако для передачи электроэнергии на большие расстояния напряжение приходится многократно увеличивать.

ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ПЕРЕДАЮТ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ ПОД ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ?

Главная причина потерь при передаче электроэнергии — *нагревание проводов*, то есть превращение электрической энергии во внутреннюю.

Напомним, что согласно закону Джоуля — Ленца при прохождении тока в проводнике выделяется количество теплоты $Q = I^2 R t$, где I — сила тока, R — сопротивление проводника, t — время прохождения тока (см. § 4. *Работа и мощность постоянного тока*). Следовательно, чтобы уменьшить нагревание проводов, надо уменьшать их сопротивление и силу тока в них.

Чтобы уменьшить сопротивление проводов, увеличивают их диаметр, но очень толстые провода слишком тяжелы и, кроме того, на них пошло бы много дорогой меди. Так что главный резерв борьбы с потерями — уменьшение силы тока в проводах.

Силу тока действительно можно уменьшить, причем многократно, но ценой *повышения напряжения во столько же раз*, так как передаваемая потребителю мощность равна *произведению* $P = UI$, где U — напряжение в сети.

При заданной мощности сила тока $I = \frac{P}{U}$. Подставляя это выражение в формулу $Q = I^2 R t$, получаем $Q = \frac{P^2 R t}{U^2}$, откуда следует, что при заданной передаваемой мощности P и заданном

сопротивлении проводов R тепловые потери в проводах *обратно пропорциональны квадрату напряжения U* .

А это значит, что при повышении напряжения в тысячу раз потери на нагревание проводов уменьшаются в *миллион раз!*

Почему высокое напряжение нельзя вводить в жилые дома?

Хотя высокое напряжение и имеет описанное выше огромное преимущество, у него есть и большой недостаток: оно *опасно* для жизни. Поэтому перед передачей потребителю напряжение в несколько этапов понижают.

И все-таки напряжение во внутриквартирной проводке (обычно 220 В) остается опасным для жизни. Так что прежде чем ремонтировать неисправный электроприбор, *обесточьте его!*

КАК ПОВЫШАЮТ И ПОНИЖАЮТ НАПРЯЖЕНИЕ?

Повышение и понижение напряжения осуществляют с помощью *трансформаторов*¹.

Трансформатор состоит из двух катушек изолированного провода, намотанных на общий стальной сердечник (рис. 10.4).

На одну катушку (называемую первичной обмоткой) подают переменный ток одного напряжения, а с другой катушки (вторичной обмотки) снимают переменный ток другого напряжения.

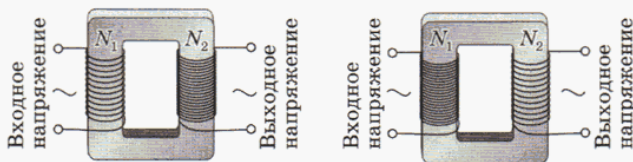


Рис. 10.4. Повышающий и понижающий трансформаторы

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Переменный ток в первичной обмотке создает переменное магнитное поле. Оно сосредоточено в основном внутри стального сердечника, так что обе обмотки пронизываются *одним и тем же* переменным магнитным потоком. Поэтому вследствие явления электромагнитной индукции *в каждой витке каждой обмотки* возникает одна и та же ЭДС индукции.

Суммарная ЭДС в каждой из катушек равна сумме ЭДС во всех ее витках, так как витки соединены друг с другом последовательно. Поэтому отношение напряжений U_1 и U_2 на вторичной и первичной обмотках равно отношению числа витков в них: $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$.

Например, если во вторичной обмотке в 10 раз больше витков, чем

¹ От латинского *transformare* — преобразовывать.

в первичной, напряжение во вторичной обмотке будет в 10 раз больше, чем в первичной.

Если напряжение во вторичной обмотке трансформатора больше, чем в первичной, его называют *повышающим*, а если меньше, то *понижающим*.

Основными потребителями электроэнергии являются производство и транспорт. На бытовые нужды приходится не более 5—10 % всей производимой электроэнергии.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. На каких электростанциях производится сегодня основная доля электроэнергии? Опишите кратко принципы действия электростанций каждого типа.
2. На каком явлении основано действие генераторов электрического тока?
3. Почему при равномерном вращении рамки в постоянном магнитном поле в ней индуцируется не постоянный, а переменный ток?
4. С какой целью в генераторе электрического тока используют скользящие контакты (так называемые щетки)?
5. Что вращают на генераторах электростанций — рамки или магниты? Чем это обусловлено?
6. Почему крупные электростанции оказывают вредное воздействие на окружающую среду? Опишите кратко воздействие на среду тепловых, атомных и гидроэлектростанций.
7. Какие вам известны альтернативные источники электроэнергии?
8. Почему электрическую энергию передают на большие расстояния под высоким напряжением?
9. Почему высокое напряжение нельзя вводить в жилые дома?
10. Как повышают и понижают напряжение? Какие приборы при этом используют? На чем основано их действие?
11. Приведите примеры потребления энергии на производстве, на транспорте, в системах связи, торговле, городском хозяйстве, при создании интеллектуальной продукции, в быту.
12. Во сколько раз уменьшаются потери на нагревание проводов при повышении напряжения в 100 раз?

1. Теория Максвелла
2. Электромагнитные волны

В середине 19-го века английский физик Джеймс Клерк Максвелл построил теорию электромагнитных явлений.

Одним из важнейших предсказаний этой теории явилось существование электромагнитных волн. В конце 19-го века это предсказание подтвердил на опыте немецкий физик Генрих Герц.

1. ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

Исследования Майкла Фарадея продолжил его соотечественник Джеймс Клерк Максвелл. Его математическое дарование¹ дополнило поразительное физическое чутье Фарадея.



Джеймс Клерк Максвелл
(1831—1879)

Когда Максвелл начал свои исследования, на опыте было уже установлено, что электрическое поле создается электрическими зарядами, а также переменным магнитным полем (вспомните о явлении электромагнитной индукции).

О магнитном же поле было известно только, что оно создается электрическими токами (движущимися электрическими зарядами). Однако для построения внутренне согласованной теории единого электромагнитного поля Максвеллу потребовалось сделать предположение, что

магнитное поле создается также переменным электрическим полем.

Построенная Максвеллом теория электромагнитного поля не только объяснила все уже известные факты и явления — из нее следовало чрезвычайно важное *предсказание* нового физического явления.

Именно оно и стало главным следствием теории Максвелла.

¹ Свою первую научную работу по математике Максвелл опубликовал, когда ему не было еще четырнадцать лет.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ПРЕДСКАЗАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Из теории Максвелла следовало, что

переменные поля — электрическое и магнитное — взаимно порождают друг друга.

А это означает, что такие поля могут отделиться от первоначально породивших их электрических зарядов и пуститься в «самостоятельное плавание» в виде *электромагнитных волн* — распространяющихся в пространстве возмущений электромагнитного поля.

Существование электромагнитных волн и было главным предсказанием теории Максвелла.

Он смог даже теоретически вычислить скорость распространения этих волн, используя только экспериментальные данные о взаимодействии электрических зарядов и электрических токов. Полученный «на кончике пера» результат поразил ученого: скорость электромагнитных волн *совпала с уже измеренной к тому времени скоростью света!*

Удивление ученого и его волнение были связаны с тем, что до той поры световые явления никак не связывали с электрическими и магнитными.

«Вряд ли мы сможем избежать заключения, — осторожно формулируя, настаивал Максвелл в научной статье, — что свет — это поперечные волнообразные движения той же самой среды¹, которая вызывает электрические и магнитные явления».

Однако любая — даже самая красивая — научная теория требует подтверждения на эксперименте. А подтвердить существование электромагнитных волн на опыте долгое время не удалось.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НА ОПЫТЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Сторонниками теории Максвелла были в основном английские физики (может быть, отчасти потому, что сам Максвелл был англичанином). Немецкие же физики придерживались теории, согласно которой электрические и магнитные явления обусловлены действием на расстоянии (дальнодействием).

И немецкий физик Генрих Герц решил поставить опыт с целью *опровергнуть* теорию Максвелла.

¹ Как будет рассказано далее, для распространения электромагнитных волн не нужна среда — они могут распространяться и в вакууме.



**Генрих Герц
(1857—1894)**

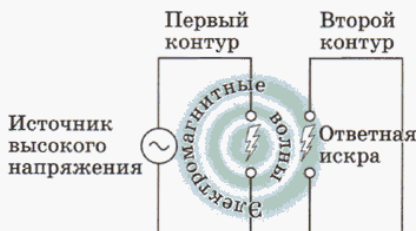


Рис. 11.1. Схема опыта Герца по обнаружению электромагнитных волн

В узком промежутке незамкнутого контура с помощью высокого напряжения возбуждалась искра (рис. 11.1). Если бы электромагнитные волны существовали, они должны были бы, распространившись в пространстве, «зажечь» искру во втором контуре, не соединенном с первым.

Герц предполагал, что искры во втором контуре не будет. Но опыт показал, что искра во втором контуре неизменно следует за искрой в первом!

А это означало, что электромагнитные волны действительно *существуют*.

Когда Герц измерил скорость этих волн, она совпала со скоростью света — как и предсказывал Максвелл!

Так свершилось открытие, которое навсегда поставило имя Генриха Герца рядом с именем Джеймса Клерка Максвелла.

Увы, самому Максвеллу не довелось дожить до экспериментального подтверждения его великой теории.

ГДЕ МОГУТ РАСПРОСТРАНЯТЬСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ?

Как видно из приведенных на предыдущей странице слов Максвелла, он считал, что электромагнитные волны распространяются в некоторой среде. Существование такой «светоносной» среды, которую называли эфиром, предполагали и многие последователи Максвелла.

В конце 19-го века были поставлены исключительно точные эксперименты для обнаружения так называемого «эфирного ветра», обусловленного движением Земли относительно эфира. Однако никаких следов «эфирного ветра» обнаружить не удалось.

В начале 20-го века выдающийся физик Альберт Эйнштейн¹ создал *специальную теорию относительности*, которая убедительно объяснила все электромагнитные явления, не требуя существования эфира. Согласно теории относительности электромагнитные волны могут распространяться и в *вакууме*. Причем в вакууме скорость электромагнитных волн наибольшая — около² 300 000 км/с.

Свет может идти через пустоту миллиарды лет, принося нам все новые интригующие сведения о звездах и галактиках (мы расскажем об этом в *главе 8. Звезды, галактики, Вселенная*). Вот почему мы видим огромное множество звезд, но «слышим» только великое молчание космоса: в межзвездном пространстве нет среды, в которой может распространяться звук.

Как будет показано в § 18. *Кванты света — фотоны*, световые волны можно также рассматривать как *поток частиц* — фотонов. А возможность движения *частиц* в вакууме уже не кажется странной.

ЧЕМ ИЗЛУЧАЮТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ?

Как следует из теории Максвелла и подтверждается опытом,

электромагнитные волны излучаются ускоренно движущимися заряженными частицами.

Например, колебания электронов в недрах Солнца и звезд рождают электромагнитные волны, которые, пройдя огромные расстояния, действуют на электроны в атомах наших глаз.

Если заряженная частица совершает колебания, то излучаемые этой частицей электромагнитные волны имеют частоту, равную частоте колебаний частицы.

КАК НАПРАВЛЕН ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ?

Если заряженная частица, являющаяся источником электромагнитных волн, совершает гармонические колебания, то на большом расстоянии³ от нее электрическое и магнитное поля представляют собой гармонические⁴ волны.

¹ Альберт Эйнштейн жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

² Точное значение скорости электромагнитных волн (скорости света) 299 792 458 м/с.

³ Большом по сравнению с длиной волны.

⁴ Гармоническими волнами (по аналогии с гармоническими колебаниями) называют волны, имеющие синусоидальную форму.

На рис. 11.2 схематически изображена «мгновенная фотография» электромагнитной волны, то есть зависимость от координат напряженности электрического поля и индукции магнитного поля в определенный момент времени.

В каждой точке пространства, сквозь которое движется электромагнитная волна, модуль напряженности электрического поля прямо пропорционален модулю индукции магнитного поля, а направлены эти векторы под прямым углом друг к другу.

Гребни электромагнитной волны перемещаются в пространстве со скоростью света c .

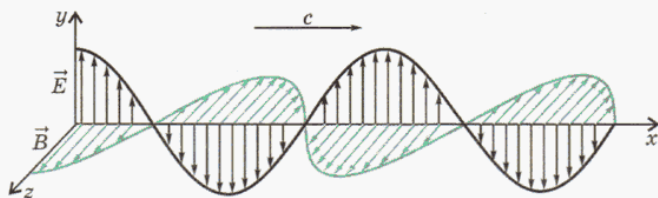


Рис. 11.2. Электрическое и магнитное поля в плоской электромагнитной волне

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Согласно теории Максвелла электромагнитные волны обладают не только энергией, но и *импульсом*, то есть оказывают *давление*. Расчеты показывают, например, что давление солнечного света на отражающую поверхность вблизи Земли составляет примерно одну десятиллиардную часть атмосферного давления.

Но даже такое малое давление света удалось измерить: сделал это в 1900 году российский физик Петр Николаевич Лебедев.



Петр Николаевич Лебедев
(1866—1912)

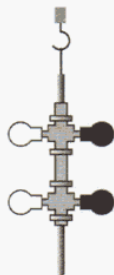


Рис. 11.3. Главная часть прибора Лебедева для измерения давления света

Лебедев понимал, что на зеркальную поверхность свет оказывает вдвое большее давление, чем на поглощающую, так как при отражении от зеркальной поверхности свет получает дополнительный импульс, изменяя направление распространения на противоположное. И ученый догадался, что это различие давлений можно использовать для измерения давления света.

Вот как Лебедев поставил свой опыт. В сосуде, из которого был откачан воздух, на тонкой стеклянной нити подвесили стержень с крылышками (рис. 11.3). Одна сторона крылышек была зачернена и поэтому поглощала свет, а другая сторона была зеркальной — она отражала свет, и поэтому он оказывал на эту сторону вдвое большее давление. Вследствие разности давлений на крылышки стержень поворачивался, и по углу закручивания нити можно было измерить малое различие в силах давления на разные стороны крылышек. Результаты опыта Лебедева явились еще одним подтверждением теории Максвелла.

Существование давления света становится более наглядным, если учесть, что свет, как будет показано в § 18. *Кванты света — фотоны*, обладает свойствами не только волн, но и частиц. Частицы света, названные фотонами, обладают импульсом. Поэтому, согласно закону сохранения импульса, при поглощении или отражении света изменяется импульс тела, с которым взаимодействуют фотоны. А это и означает, что свет оказывает давление на это тело.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем, согласно теории Максвелла, создается электрическое поле? магнитное поле?
2. Что такое электромагнитные волны?
3. На основании какого совпадения Максвелл предположил, что свет представляет собой электромагнитные волны?
4. Как были обнаружены на опыте электромагнитные волны? Кто поставил этот опыт?
5. Где могут распространяться электромагнитные волны?
6. Чем излучаются электромагнитные волны?
- 7*. Как направлены электрическое и магнитное поля в электромагнитной волне?
- 8*. Кто установил на опыте существование давления света?
- 9*. В описанном опыте Герца оба контура имели одинаковые размеры и их «искровые промежутки» были параллельны. Как вы думаете, зачем это было нужно?

§ 12. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

1. Изобретение радио и принципы радиосвязи
2. Генерирование и излучение радиоволн
3. Передача и прием радиоволн

Электромагнитные волны распространяются на огромные расстояния, поэтому с их помощью передают информацию, в том числе звук (радио) и изображение (телевидение).

1. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО И ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО

Передачу информации с помощью электромагнитных волн впервые осуществил российский инженер Александр Степанович Попов.

7 мая 1895 года Попов продемонстрировал работу прибора, который регистрировал электромагнитные волны, порожденные удаленной грозой (грозоотметчик), а 24 марта 1896 года на заседании физического отделения Российского физико-химического общества в Санкт-Петербурге Попов передал первую в мире радиограмму. Она состояла всего из двух слов — «Генрих Герц».



Александр Степанович
Попов (1859—1906)

В следующем году благодаря радиограмме, посланной Поповым на расстояние 44 км, удалось спасти жизнь 27 рыбакам, унесенным в море на оторвавшейся льдине. Однако работы Попова не получили тогда развития в России.

В Италии передачей информации с помощью электромагнитных волн активно занимался инженер Гульельмо Маркони. Он также не нашел поддержки у себя на родине и уехал в Англию, где заинтересовал своими разработками Адмиралтейство.

В 1901 году Маркони осуществил передачу радиосигналов через Атлантический океан, доказав, что радиоволны могут огибать Землю (подробнее об этом рассказано ниже).

ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Электромагнитные волны низкой частоты имеют малую энергию и быстро затухают, поэтому на большие расстояния можно передавать только электромагнитные волны достаточно большой частоты — от 1 до 30 000 МГц. Это во много раз больше, чем частота звуковых колебаний (от 20 Гц до 20 кГц).

Поэтому при осуществлении радиосвязи в качестве «почтового голубя» используют электромагнитные волны высокой частоты, которая так и называется «несущая частота».

В радиопередатчике с помощью специальных приборов к высокочастотным электрическим колебаниям присоединяют колебания звуковой частоты, в результате чего в пространство излучается видоизмененная (модулированная) высокочастотная волна.

Такую волну может принять радиоприемник, расположенный порой на другой стороне земного шара: в антенне приемника возникают модулированные высокочастотные электрические колебания. А затем с помощью специальных приборов из этих колебаний выделяют исходные колебания звуковой частоты.

На приведенных ниже рисунках схематически представлены основные этапы передачи и приема радиоволн. Далее мы остановимся на каждом из них подробнее.



Рис. 12.1. Преобразование звуковых колебаний в электрические с помощью микрофона

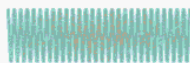


Рис. 12.2. Создание высокочастотных электрических колебаний

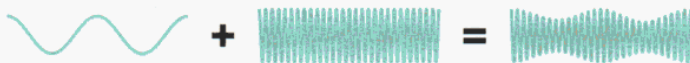


Рис. 12.3. Модуляция электромагнитной волны высокой частоты

Рис. 12.4. Модулированная волна высокой частоты излучается передающей антенной

Встретив на своем пути приемную антенну, модулированная волна «раскачивает» в ней свободные электроны, вследствие чего в антенне возникают электрические колебания, повторяющие электрические колебания в передающей антенне.



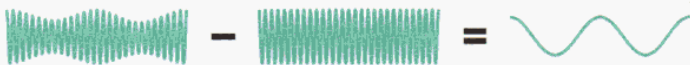


Рис. 12.5. В приемнике из принятой модулированной волны «извлекают» переданную информацию, то есть получают снова электрические колебания звуковой частоты. Этот процесс называют детектированием

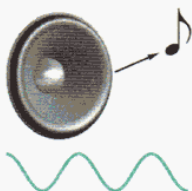


Рис. 12.6. С помощью динамика электрические колебания преобразуются в звуковые

Использование волн высокой частоты позволяет решить еще одну принципиально важную для радиосвязи задачу.

Благодаря тому, что каждая радиостанция может использовать свою несущую частоту, одновременно, не мешая друг другу, могут работать тысячи радиостанций (в том числе и мобильных телефонов, каждый из которых является как бы миниатюрной радиостанцией).

2. ГЕНЕРИРОВАНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОВОЛН

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Устройство, в котором создаются и поддерживаются электромагнитные колебания заданной частоты, называют *генератором электромагнитных колебаний*.

Основной элемент такого генератора — *колебательный контур*, состоящий из катушки и конденсатора.

Если соединить пластины заряженного конденсатора через катушку (рис. 12.7, а), конденсатор начнет разряжаться, и через катушку пойдет электрический ток.

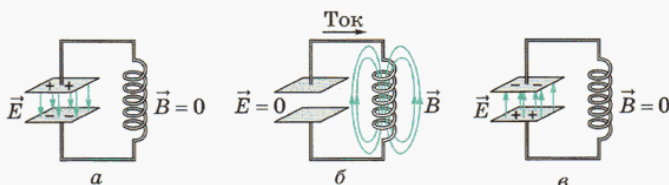


Рис. 12.7. Колебательный контур

Вследствие явления самоиндукции сила тока в катушке будет увеличиваться постепенно и достигнет максимума, когда конденсатор полностью разрядится (рис. 12.7, б).

Однако из-за явления самоиндукции после разрядки конденсатора ток не прекратится мгновенно: он будет продолжать течь еще некоторое время в том же направлении, снова заряжая пластины конденсатора (рис. 12.7, в).

После этого весь процесс повторится в «противоположном» направлении, и колебательный контур вернется в исходное состояние — готовый к следующему колебанию.

Таким образом, электромагнитные колебания возникают по той же причине, что и механические колебания, то есть вследствие явления инерции: в случае электромагнитных процессов инерция обусловлена явлением электромагнитной индукции.

При электромагнитных колебаниях происходят периодические *превращения энергии*: энергия электрического поля превращается в энергию магнитного поля, а затем энергия магнитного поля снова превращается в энергию электрического поля.

Английский физик Дж. Дж. Томсон вывел формулу для периода электромагнитных колебаний в контуре: $T = 2\pi\sqrt{LC}$, где L — индуктивность катушки, C — емкость конденсатора. Из формулы Томсона следует, что, изменяя L и C , можно генерировать электрические колебания заданной частоты.

При излучении электромагнитных волн расходуется энергия, поэтому колебательный контур необходимо постоянно «подпитывать» энергией. С этой целью колебательный контур периодически (с частотой, равной частоте колебаний в контуре) подключается к источнику тока. Этими подключениями «управляет» сам колебательный контур с помощью электронного устройства, называемого *транзистором*.

Как модулируют волну высокой частоты?

Модуляцией называют изменение формы волны высокой частоты. Рассмотрим так называемую *амплитудную модуляцию*.

В этом случае амплитуда электромагнитных колебаний в генераторе электромагнитных колебаний изменяется с частотой, равной частоте звуковых колебаний. В результате излучается модулированная электромагнитная волна, форма которой схематически изображена на рис. 12.3.

Чтобы осуществить амплитудную модуляцию, изменяют (со звуковой частотой) напряжение, подпитывающее колебательный контур.

С этой целью последовательно с источником тока можно, например, подключить микрофон.

3. ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОВОЛН

ПОЧЕМУ РАДИОВОЛНЫ МОГУТ ОГИБАТЬ ЗЕМЛЮ?

Когда Маркони решил осуществить радиопередачу через Атлантический океан, все специалисты дружно отговаривали его, уверяя, что радиоволны, подобно световым волнам, распространяются прямолинейно и поэтому не могут обогнуть Землю.

Однако Маркони решил, что «кто не рискует, тот не выигрывает», и... первая радиопередача через океан все-таки состоялась!

Успех Маркони объясняется тем, что радиоволны отражаются ионосферой — слоем земной атмосферы, расположенным на высоте 50—100 км и содержащим большое количество ионов и свободных электронов (рис. 12.8).



Рис. 12.8. Радиоволны могут огибать земной шар, потому что они отражаются от ионосферы

Особенно хорошо от ионосферы отражаются радиоволны с длиной волны в несколько десятков метров (так называемые короткие волны), поэтому радиостанции, вещающие на большие расстояния, работают обычно на таких волнах.

КАК ПРИЕМНИК ВЫБИРАЕТ НУЖНУЮ РАДИОСТАНЦИЮ?

Электроны в антенне радиоприемника совершают чрезвычайно сложное движение, «отзываясь» на сотни радио- и телепередач, а также на тысячи разговоров мобильных телефонов.

Из этой невообразимой смеси колебаний радиоприемник должен отобрать колебания с частотой интересующей вас станции. Для этого также используется колебательный контур. Вследствие явления резонанса в нем «раскачиваются» только колебания с частотой, близкой частоте его собственных колебаний — а она, как вы уже знаете, определяется индуктивностью катушки и емкостью конденсатора контура.

Переключая диапазоны и поворачивая ручку настройки приемника, вы изменяете индуктивность катушки и емкость

конденсатора в колебательном контуре, а следовательно, и частоту его собственных колебаний. Так и происходит «настройка» на нужную станцию.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

После выбора нужной «несущей» частоты принятый модулированный сигнал сначала усиливают с помощью специальных приборов. Затем его преобразуют в низкочастотные колебания звуковой частоты, повторяющие колебания исходного звукового сигнала на передающей радиостанции. Этот процесс называют *детектированием*.

Детектирование осуществляется в несколько этапов, которые схематически изображены на рисунках ниже. Можно заметить, как с каждым этапом колебания все более приближаются к исходному сигналу.

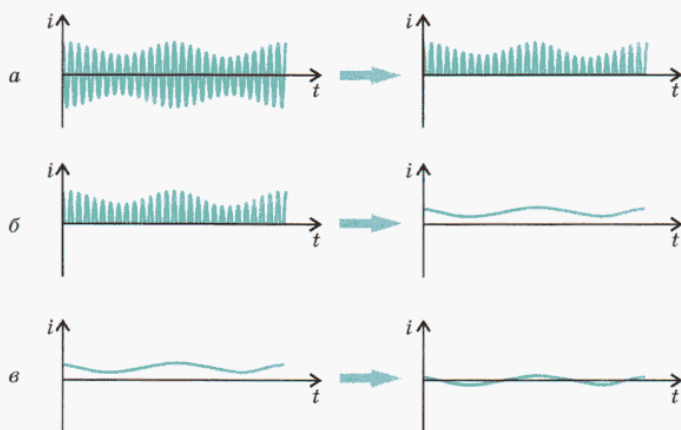


Рис. 12.9. Этапы детектирования: *a* — выпрямление высокочастотного сигнала; *б* — сглаживание пульсирующего сигнала; *в* — удаление постоянной составляющей сигнала звуковой частоты

КАК РАБОТАЕТ МОБИЛЬНЫЙ ТЕЛЕФОН?

Мобильный, или сотовый, телефон — это миниатюрная комбинация телефона, радиоприемника и радиопередатчика, которая стала возможной только благодаря достижениям современной физики (рис. 12.10).

Главное преимущество такого телефона состоит в том, что он поддерживает постоянную радиотелефонную связь при перемещении абонента в пределах так называемой зоны покрытия.

Вся зона покрытия разделена на ячейки, называемые также сотами (отсюда и название телефона). В каждой ячейке имеется свой приемник-передатчик (антенны устанавливают на телебашнях, высоких зданиях и на специально построенных вышках). Включенный сотовый телефон автоматически через определенный промежуток времени посылает сигналы, поддерживая радиосвязь с ближайшим приемником-передатчиком, который предоставляет ему один из свободных каналов.

При перемещении мобильного телефона из одной ячейки в другую он автоматически переключается на свободный канал ближайшего приемника-передатчика.



Рис. 12.10. Мобильный телефон

Благодаря успехам современной физики и техники мобильные телефоны удалось сделать миниатюрными и в то же время доступными: сотни миллионов людей носят их сегодня в карманах или дамских сумочках.

КАК ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ИСПОЛЬЗУЮТ КОМПЬЮТЕР?

Современный мир немислим без Всемирной сети, как называют Интернет — компьютерную сеть, соединившую воедино десятки тысяч локальных компьютерных сетей во всем мире. «Чудо» Интернета тоже стало возможным только благодаря достижениям современной физики.

Все большее число людей пользуются услугами Интернета, и в ближайшем будущем Интернет станет, видимо, основным способом получения и передачи информации. Для передачи информации в Интернете используют телефонные линии связи, оптоволоконные линии и радиоволны (в том числе ретранслируемые спутниками связи).

Одна из главных проблем Интернета неразрывно связана с его главным преимуществом: это колоссальный объем находящейся в нем информации. Из-за этого найти *нужную* информацию бывает весьма трудно.

Для облегчения поиска изыскиваются все более совершенные средства. Большую помощь в этом оказывают компьютеры. Во-первых, с помощью компьютеров огромные объемы информации обрабатываются и структурируются. Во-вторых, благодаря компьютеру информация может быть представлена в наиболее удобной и наглядной «мультимедийной» форме — с широким использованием графики, звука, видеоизображения.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Кто впервые использовал электромагнитные волны для передачи информации?
2. Как преобразуются звуковые колебания в электрические?
3. Почему при радиосвязи используют электромагнитные волны высокой частоты?
4. Что такое модуляция? Как модулируют волну высокой частоты?
5. Как происходит излучение, передача и прием радиоволн?
6. Что такое детектирование? Как преобразуется модулированный сигнал при демодуляции?
7. Как преобразуются электрические колебания в звуковые?
- 8*. Благодаря чему возможна одновременная работа многих радиостанций?
- 9*. Как генерируют электромагнитные волны высокой частоты?
- 10*. Почему радиоволны могут огибать Землю?
- 11*. Как приемник выбирает нужную радиостанцию?
- 12*. Как для передачи и обработки информации используется компьютер?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Магнитный поток** (или поток магнитной индукции) $\Phi = BS \cos \alpha$, где B — модуль магнитной индукции, S — площадь контура, α — угол между вектором магнитной индукции и перпендикуляром к плоскости контура.
- **Явление электромагнитной индукции** — возникновение электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. Это явление открыл английский ученый **М. Фарадей**.
- Индукционный ток в замкнутом контуре возникает при **изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром**.
- Электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, называют **вихревым**. Линии напряженности вихревого электрического поля **замкнуты**.
- **Закон электромагнитной индукции** $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.
- **Правило Ленца**: индукционный ток имеет такое направление, что созданное им магнитное поле стремится скомпенсировать то изменение магнитного потока, которое вызвало данный ток. Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии.
- Явление **самоиндукции** состоит в возникновении ЭДС индукции в контуре при изменении силы тока в этом же контуре.
- **Энергия магнитного поля** тока в контуре с индуктивностью L равна $W_m = \frac{LI^2}{2}$, где I — сила тока в контуре, L — индуктивность контура.
- Электроэнергию производят в основном на электростанциях трех типов: **тепловых электростанциях, атомных электростанциях, гидроэлектростанциях**. Все крупные электростанции оказывают вредное воздействие на окружающую среду.

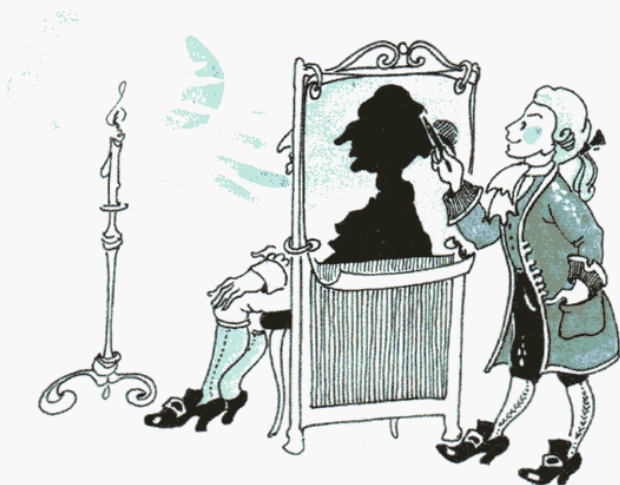
- Действие *генератора электрического тока* основано на явлении электромагнитной индукции.
- Для уменьшения потерь при передаче электроэнергии на большие расстояния повышают напряжение. Перед подачей потребителям напряжение понижают в целях безопасности. Для повышения и понижения напряжения используют *трансформаторы*, действие которых основано на явлении электромагнитной индукции.
- *Теорию электромагнитных явлений* построил английский ученый *Дж. К. Максвелл*. Согласно теории Максвелла электрическое поле создается электрическими зарядами и переменным магнитным полем, а магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и переменным электрическим полем.
- Одним из предсказаний теории Максвелла явилось *существование электромагнитных волн*. Их открыл на опыте немецкий физик *Г. Герц*.
- Электромагнитные волны распространяются со скоростью света, потому что свет является электромагнитной волной. Электромагнитные волны могут распространяться в вакууме. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме — около 300 000 км/с.
- Электромагнитные волны излучаются ускоренно движущимися заряженными частицами.
- *Давление света* было впервые измерено российским физиком *П. Н. Лебедевым*.
- Для передачи информации с помощью электромагнитных волн необходимо использовать электромагнитные волны высокой частоты.
- Впервые передачу информации с помощью электромагнитных волн осуществил российский инженер *А. С. Попов*.
- *Этапы передачи информации с помощью электромагнитных волн*: преобразование низкочастотных (например, звуковых) колебаний в электрические; создание высокочастот-

ных электромагнитных колебаний; модуляция электромагнитной волны высокой частоты; излучение, передача и прием модулированной волны; детектирование электромагнитной волны высокой частоты; преобразование электрических колебаний в звуковые.

- Период собственных колебаний в *колебательном контуре* определяется *формулой Томсона*: $T = 2\pi\sqrt{LC}$.
- Благодаря отражению от ионосферы *радиоволны могут огибать Землю*.
- При приеме радиопередачи для выбора определенной волны используют явление *резонанса*.
- Одним из основных средств передачи и получения информации сегодня становится *Интернет*.

Глава 4

ОПТИКА



Как вы уже знаете, свет представляет собой электромагнитные волны. Однако волновые свойства света проявляются в основном тогда, когда размеры препятствий при распространении света сравнимы с длиной световой волны. Если же размеры препятствий намного больше длины волны света, можно использовать представление о лучах света.

Световые волны с различной длиной волны преломляются в веществе по-разному. Вследствие этого узкий пучок белого света после преломления в стеклянной призме разлагается в цветной спектр, в котором представлены все цвета радуги.

Начнем мы эту главу с рассказа о том, как развивались и развиваются представления о природе света.

1. Развитие представлений о природе света
2. Прямолинейное распространение света
3. Отражение света
4. Преломление света

Основным понятием геометрической оптики является луч света. Геометрическая оптика изучает распространение, отражение и преломление лучей света.

1. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ СВЕТА

Световой луч — это идеализация очень тонкого светового пучка¹. Раздел оптики, в котором изучается ход световых лучей, называют геометрической оптикой, так как для определения хода лучей часто используют геометрические построения.

Первый трактат по геометрической оптике написал древнегреческий ученый Евклид². Первое положение евклидовой «Оптики» гласит: «Исходящие из глаз лучи распространяются прямолинейно». Сегодня это может вызвать улыбку, но идущие первыми могут и ошибаться (даже если это великие ученые). Обратим лучше внимание на правильное утверждение о *прямолинейном* распространении лучей света. В «Оптике» Евклида правильно сформулированы также законы отражения света.

Следующий важный шаг в изучении световых явлений сделал арабский ученый Альхазен в 11-м веке. В книге «Сокровище оптики» он писал: «Зрительный образ создается лучами, которые испускаются видимыми предметами и попадают в глаз».

ЧАСТИЦЫ ИЛИ ВОЛНЫ?

В 17-м веке ученые начали изучать физическую природу света. По данным наблюдений за затмениями спутника Юпитера датский астроном Оле Рёмер впервые смог определить скорость света. И хотя впоследствии выяснилось, что полученный им результат не очень точен, главным было то, что скорость света оказалась *конечной*. Так было установлено, что свет *движется*.

¹ Понятие светового луча играет в оптике такую же важную роль, как в механике — понятие материальной точки, а в электродинамике — точечного заряда.

² Его именем названа построенная греческими математиками «евклидова геометрия», которую и сегодня изучают в школах всего мира.

В те времена ученым были известны две формы движения, казавшиеся тогда *взаимоисключающими*: это движение *частиц*, при котором происходит перемещение вещества, и распространение *волн*, при котором вещество не перемещается.

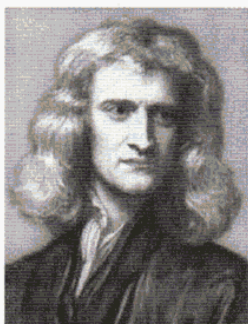
Возник вопрос: что представляет собой свет — поток частиц или распространение волн?

Корпускулярная теория света

Исаак Ньютон предположил, что свет является потоком мельчайших частиц. Такое представление о природе света получило название *корпускулярной*¹ теории света.

Корпускулярная теория убедительно объясняла прямолинейное распространение света, а также его отражение. Она объясняла также распространение света в пустоте (благодаря чему мы видим Солнце и звезды). Это свойственно потокам частиц, а для распространения волн, как тогда считали, необходима материальная среда.

Но если она существует, то почему огромная Земля и планеты тысячелетиями движутся вокруг Солнца, не испытывая никакого сопротивления этой среды?



Исаак Ньютон
(1643—1727)



Христиан Гюйгенс
(1629—1695)

Волновая теория света

Создателем *волновой* теории света был современник Ньютона, голландский ученый Христиан Гюйгенс. Главным доводом в пользу волновой теории было то, что световые лучи свободно проходят один сквозь другой, — а это характерно именно для распространения волн. В пересекающихся же потоках частиц должны происходить столкновения.

¹ От латинского *corpusculum* — частица.

В рамках волновой теории света Гюйгенс смог дать объяснение законам отражения и преломления света.

И ЧАСТИЦЫ, И ВОЛНЫ!

В течение полутора веков ни одна из двух теорий света не могла одержать убедительной победы над другой. Но в 19-м веке волновая теория света начала «одерживать верх». Выяснилось, что некоторые световые явления¹ можно объяснить только с помощью волновой теории, а затем на опыте была установлена электромагнитная природа световых волн.

И сторонники корпускулярной теории света сдались: пришлось признать, что ошибаться мог даже великий Ньютон.

Но дальнейшее развитие событий оказалось неожиданным.

Так случилось, что в конце 19-го века *один и тот же* ученый практически *в одно и то же время* получил опытные подтверждения как *волновой*, так и *корпускулярной* теории света!

Этим ученым был уже известный вам Генрих Герц. Подтвердив на опыте, что свет представляет собой электромагнитные волны, он тут же обнаружил, что свет может выбивать электроны из металла. Это явление называли *фотоэффектом*. Объяснил законы фотоэффекта Альберт Эйнштейн, предположив, что свет обладает свойствами *частиц*. Более подробно мы расскажем об этом в § 19. *Фотоэффект*.

Так выяснилось, что Ньютон, настаивавший на корпускулярной природе света, оказался прав. Но прав оказался и Гюйгенс, считавший, что свет имеет волновую природу!

Двойственная природа света оказалась для физиков «крепким орешком»: только в 20-м веке общими усилиями ученых нескольких стран была построена теория, которая совместила свойства волн и частиц. Это *квантовая механика*. Более подробно мы расскажем о ней в *Главе 5. Кванты и атомы*.

УСЛОВИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Опыт показывает, что

представление о лучах света применимо, когда размеры препятствий для света намного больше длины световой волны.

В таких случаях волновые свойства света не проявляются и можно использовать законы геометрической оптики.

А поскольку длины волн видимого света меньше одной тысячной доли миллиметра, то область применимости геометрической

¹ Это явления интерференции и дифракции, о которых мы расскажем в § 16. *Световые волны*.

оптики очень широка: ее законы объясняют строение глаза и действие оптических приборов — лупы, микроскопа, телескопа.

2. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

Первый закон геометрической оптики — это

закон прямолинейного распространения света: в вакууме и в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Заметим, что при распространении света в неоднородной среде лучи света искривляются. Этим обусловлены, например, миражи (о них мы расскажем ниже).

3. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

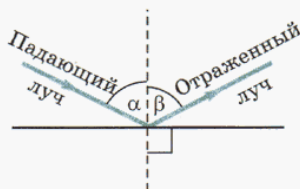
ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Опыт показывает, что когда свет падает на гладкую отражающую плоскую поверхность (например, поверхность зеркала или спокойной воды), выполняются следующие *законы отражения* (рис. 13.1):

1. Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восставленным в точке падения луча.
2. Угол отражения равен углу падения.

Рис. 13.1. Отражение луча света от зеркальной поверхности

Обратите внимание: углы падения и отражения света отсчитываются от перпендикуляра к отражающей плоскости, восставленного в точке падения луча.



Зеркальное отражение

Построив ход нескольких лучей, исходящих из *точечного источника света*¹, мы увидим, что после отражения от зеркальной плоской поверхности лучи идут так, будто они испущены из *одной точки*, находящейся по другую сторону отражающей плоскости на таком же расстоянии от нее, как точечный источник (рис. 13.2). Эта точка называется *изображением* точечного источника.

¹ Так называется модель источника света, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. В геометрической оптике он является такой же удобной моделью, как точечный заряд в электродинамике и материальная точка в механике.

Таким образом, при зеркальном отражении света *изображением точки* является снова *точка*. Вот почему при отражении от такой поверхности изображение предметов будет *четким*: ведь изображение любого предмета состоит из изображений отдельных точек этого предмета.

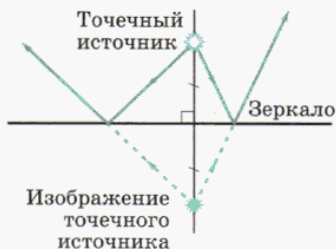


Рис. 13.2. Зеркальное отражение точечного источника света



Рис. 13.3. Диффузное отражение точечного источника света

Диффузное отражение

При отражении света от шероховатой поверхности четких изображений предметов нет. Дело в том, что отраженные от такой поверхности лучи направлены случайным образом (рис. 13.3). Такое отражение называют *диффузным* или *рассеянным*.

Диффузное отражение не является исключением: наоборот, большинство окружающих нас предметов мы видим именно благодаря диффузному отражению. Ведь чистое зеркало само по себе *невидимо* — глядя на него, мы видим только предметы, которое оно *отражает*.

Не видна также гладкая поверхность чистой воды: глядя на спокойное море или озеро, мы видим либо дно (то есть преломленные лучи, отраженные от дна), либо небо и облака (зеркально отраженные лучи).

4. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Когда луч света падает на границу раздела двух однородных прозрачных сред (например, воздуха и стекла), он не только отражается, но и *преломляется*.

Как показывают опыты, выполняются следующие *законы преломления* (рис. 13.4):

1. Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения луча.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных сред постоянно: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$.

Рис. 13.4. Отражение и преломление луча света

Интенсивность отраженного и преломленного лучей зависит от свойств сред и угла падения луча. На рисунке интенсивность каждого из трех лучей — падающего, отраженного и преломленного — схематически передана толщиной линии.



Величину n называют *относительным показателем преломления* двух данных сред.

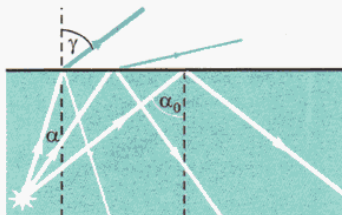
Если луч падает в данную среду из вакуума, величину n называют *абсолютным показателем преломления* (или просто показателем преломления) данной среды.

Показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы, а показатель преломления воды равен примерно 1,33. Ту из двух сред, показатель преломления которой больше, называют *оптически более плотной*.

КОГДА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ЛУЧЕЙ НЕТ?

Когда луч падает на поверхность раздела двух сред из оптически более плотной среды (например, из воды на границу «вода — воздух»), угол преломления γ больше угла падения α (рис. 13.5).

Рис. 13.5. Исчезновение преломленного луча при увеличении угла падения, когда луч света идет из оптически более плотной среды в оптически менее плотную



Поэтому возникает вопрос: что будет происходить с преломленным лучом при увеличении угла падения до 90° ? Ведь угол преломления не может быть больше 90° !

Опыт показывает, что при увеличении угла падения интенсивность преломленного луча *уменьшается*, а интенсивность отраженного — *увеличивается*. И при таком угле падения α_0 , когда угол преломления γ становится равным 90° (то есть преломленный

луч должен был бы идти вдоль плоскости раздела сред), преломленный луч вообще *исчезает* и остается только *отраженный* луч!

Этот угол падения α_0 называют *предельным углом полного отражения*, потому что, если угол падения $\alpha \geq \alpha_0$, падающий луч *полностью* отражается от границы раздела двух сред. Поэтому такое явление назвали *полным внутренним отражением*.

Волоконная оптика

Явление полного внутреннего отражения используют, например, в волоконной оптике при передаче световых сигналов по тонким стеклянным нитям — *световодам*.

Ход луча света в световоде схематически показан на рис. 13.6.

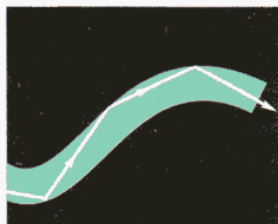


Рис. 13.6. Световод

Луч света следует за изгибами стеклянной нити, испытывая полное внутреннее отражение на ее стенках.

По проводу толщиной в волос, состоящему из тонких стеклянных нитей, передают сигналы для работы телевизоров, телефонов и компьютеров. Световоды используют и для подачи света от общего источника к различным приборным панелям в автомобилях.

Оптические волокна используют также в медицине. С их помощью изображение внутреннего органа передается на телекамеру, что позволяет производить обследование без операции.

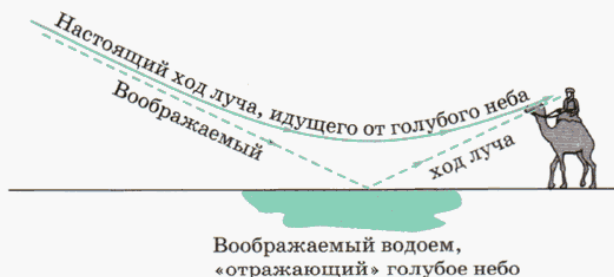


Рис. 13.7. Схема возникновения миража

Луч, идущий от голубого неба, попадает в глаз путника снизу, и поэтому путнику кажется, что он видит водоем, отражающий небо.

ПОЧЕМУ ПОЯВЛЯЮТСЯ МИРАЖИ?

Когда лучи света проходят через неоднородно нагретый воздух, они искривляются. Например, в пустыне нижние слои воздуха нагреваются от горячего песка, поэтому они теплее верхних слоев. В результате лучи света искривляются так, как показано на рис. 13.7. Это и приводит к появлению миражей.

В средних широтах также можно наблюдать подобный мираж. Благодаря ему в жаркий летний день пассажир или водитель автомобиля видит впереди «лужи» на совершенно сухом асфальте.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каково условие применимости геометрической оптики?
2. Как распространяется свет в вакууме и в однородной среде?
3. Сформулируйте законы отражения света.
4. Сформулируйте законы преломления света. Какая величина называется показателем преломления?
5. Что такое полное внутреннее отражение? Что такое предельный угол полного отражения?
6. Где находится изображение предмета в плоском зеркале?
7. Чем отличается зеркальное отражение от диффузного?
8. Благодаря чему мы видим предметы?
- 9*. Почему появляются миражи?
- 10*. Падающий луч перпендикулярен плоскости раздела сред. Чему равен угол отражения?
- 11*. Угол между падающим и отраженным лучом равен 60° . Чему равен угол падения?
- 12*. Останется ли параллельный пучок лучей параллельным после отражения от плоского зеркала? после диффузного отражения?
- 13*. Почему в море на воде видна «лунная дорожка»? Почему такая дорожка не видна на гладкой поверхности тихого озера?

§ 14. ЛИНЗЫ

1. От стеклянного шара до микроскопа
2. Виды линз и основные элементы линзы
3. Построение изображений в линзах

Линзы являются основными элементами всех оптических приборов.

Мы рассмотрим здесь виды линз, основные свойства линз, а также построение изображений в линзах.

1. ОТ СТЕКЛЯННОГО ШАРА ДО МИКРОСКОПА

О замечательной способности стеклянных шаров «увеличивать предметы» было известно еще в Средние века. Тогда же появились и очки: на одной из фресок 14-го века изображен монах в очках.

В конце 16-го века один из голландских мастеров обнаружил, что с помощью двух линз можно получить намного большее увеличение, чем с помощью одной линзы. Так появился первый *микроскоп*. Во второй половине 17-го века его значительно усовершенствовал английский физик Роберт Гук. Он обнаружил, что в «малом» ученых ждут не менее волнующие открытия, чем в «великом»: так, с помощью микроскопа Гук открыл клеточное строение живых организмов.

В начале 17-го века в Голландии появились и первые подзорные трубы, в которых также использовались две линзы. Поначалу подзорная труба служила только забавой, но когда об этом изобретении узнал Галилео Галилей, он значительно усовершенствовал подзорную трубу, создав первый *телескоп*. С помощью телескопа Галилей совершил открытия, многократно расширившие представления человека о Вселенной. Так, Галилей обнаружил, что Млечный Путь, считавшийся ранее туманностью, представляет собой гигантское скопление звезд. Теперь известно, что Млечный Путь — это наша Галактика, видимая «сбоку». Она содержит сотни миллиардов звезд, подобных нашему Солнцу. Более подробно мы расскажем об этом в § 34. *Галактики*.

Природа «открыла» свойства линз намного раньше, чем люди: она использовала их в процессе эволюции, чтобы сделать нам бесценный подарок — зрение. В § 15. *Глаз и оптические приборы* мы рассмотрим строение глаза человека.

Напомним известные вам из курса физики основной школы свойства линз, а также способы построения изображений в линзах.

2. ВИДЫ ЛИНЗ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЗЫ

Поверхности линзы обычно являются частями сферы (одна из двух поверхностей линзы может быть и плоской).

Если линза в середине толще, чем у краев, она называется *выпуклой*, а если она в середине тоньше, чем у краев, то *вогнутой* (рис. 14.1).

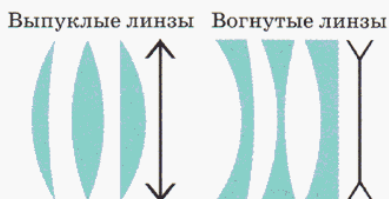


Рис. 14.1. Выпуклые и вогнутые линзы, а также схематическое изображение линз на чертежах

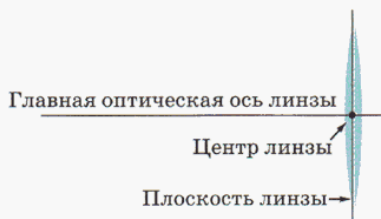


Рис. 14.2. Плоскость линзы, центр линзы и главная оптическая ось линзы

Для определенности мы будем рассматривать далее стеклянные линзы, имеющие наиболее широкое применение, и ограничимся рассмотрением *тонких* линз, толщина которых намного меньше их диаметра. Для таких линз можно считать, что вся линза лежит в одной плоскости, которая называется *плоскостью линзы* (рис. 14.2).

Точку, в которой толщина линзы максимальна (для выпуклой линзы) или минимальна (для вогнутой линзы), называют *центром линзы*.

Прямую, проходящую через центр линзы и перпендикулярную плоскости линзы, называют *главной оптической осью линзы* (см. рис. 14.2).

СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

Если на выпуклую линзу падает параллельный пучок лучей, то после преломления в линзе он становится *сходящимся*: все преломленные лучи проходят через одну точку (рис. 14.3). Поэтому такую линзу называют *собирающей*.

Заметим, забегая вперед, что оптическая система глаза действует именно как собирающая линза.

Точку, через которую после преломления в линзе проходят лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, называют *фокусом линзы* и обозначают *F*.

Каждая линза имеет два фокуса, расположенные по разные стороны линзы на равных расстояниях от нее.

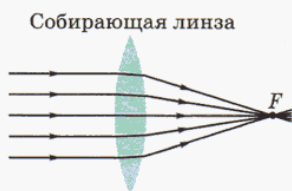


Рис. 14.3. Преломление параллельного пучка лучей в собирающей линзе



Рис. 14.4. Преломление параллельного пучка лучей в рассеивающей линзе

РАССЕИВАЮЩАЯ ЛИНЗА

Если параллельный пучок лучей падает на *вогнутую* линзу, то после преломления в ней он становится *расходящимся*: преломленные лучи идут так, будто они исходят из одной точки, находящейся с той стороны линзы, откуда падает параллельный пучок лучей (рис. 14.4). Поэтому такую линзу называют *рассеивающей*.

Точка, через которую проходят продолжения преломленных лучей, если падающий пучок параллелен главной оптической оси, также называют *фокусом линзы* и обозначают F .

Рассеивающая линза также имеет два фокуса, расположенные по разные стороны линзы на равных расстояниях от нее.

ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ И ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ

Расстояние от плоскости линзы до ее фокуса называют *фокусным расстоянием* линзы и тоже обозначается F . Фокусное расстояние в системе СИ измеряется в метрах.

Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем сильнее отклоняет она падающие на нее лучи, поэтому *оптической силой* линзы называют величину D , обратную фокусному расстоянию линзы:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Оптическую силу линзы измеряют в *диоптриях* (дптр). Например, оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 2 м равна 0,5 дптр.

3. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗАХ

ПОЧЕМУ ЛИНЗА ДАЕТ ЧЕТКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТОВ?

Все лучи света, исходящие из *одной точки*, после преломления в линзе либо пересекаются в *одной точке* (рис. 14.5), либо направлены так, что их продолжения пересекаются в *одной точке*. Эта точка называется *изображением* данной точки.

Рис. 14.5. Изображение точечного источника



Итак, изображением каждой *точки* предмета является снова *точка* (напомним, что таким же свойством обладает плоское зеркало). А поскольку изображение предмета состоит из изображений его точек, линза дает четкое изображение предметов.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ И МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Если исходящие из точки лучи после преломления в линзе сходятся, точку их пересечения называют *действительным изображением точки*: если в этой точке поместить экран, мы увидим на нем изображение точки.

Если же лучи, идущие из точки, после преломления в линзе расходятся, то точку, в которой пересекаются их *продолжения*, называют *мнимым изображением точки*. Такое изображение нельзя увидеть на экране.

Собирающая линза может давать как действительное, так и мнимое изображение точки. Если точка находится от линзы на расстоянии, большем фокусного, ее изображение будет действительным (рис. 14.5), а если точка находится от линзы на расстоянии, меньшем фокусного, то — мнимым (рис. 14.6).

Изображение же точки в рассеивающей линзе всегда мнимое (рис. 14.7).

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОЧКИ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ ЛУЧЕЙ

Для построения изображения точки достаточно построить ход двух лучей: точка пересечения этих лучей после прохождения через линзу (или их продолжений) и будет изображением точки.

Если точка не лежит на главной оптической оси, часто выбирают следующие два луча.

1. *Луч, идущий через центр линзы*, — он не изменяет направления.

2. *Луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси*, — после преломления в собирающей линзе он пройдет через ее фокус, а после преломления в рассеивающей линзе его продолжение пройдет через фокус линзы.

На рис. 14.6 приведены примеры построения изображений точки с помощью указанных двух лучей в собирающей линзе, а на рис. 14.7 — в рассеивающей линзе.

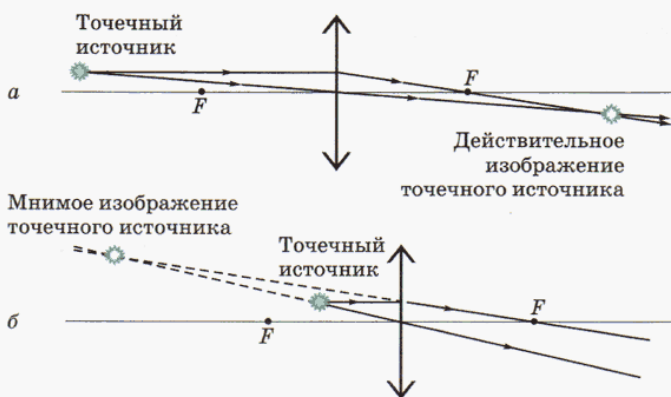


Рис. 14.6. Построение изображения точки в собирающей линзе:
а — действительное изображение; б — мнимое изображение



Рис. 14.7. Построение изображения точки в рассеивающей линзе

УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Отношение длины изображения H к длине предмета h называют *увеличением* линзы $\Gamma = \frac{H}{h}$.

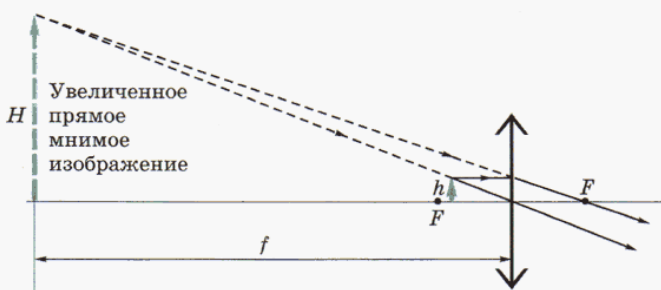


Рис. 14.8. Собирающая линза дает особенно большое увеличение, когда предмет находится близко от ее фокуса

Используя изложенные выше способы построения изображения, можно доказать, что

собирающая линза дает особенно большое увеличение, когда предмет находится вблизи ее фокуса.

Как мы увидим ниже, именно эти случаи используют в таких оптических приборах, как лупа, микроскоп и телескоп.

На рис. 14.8 показано построение увеличенного мнимого изображения предмета, расположенного чуть ближе фокусного расстояния. Из рисунка видно, что при этом увеличение линзы приближенно выражается формулой $\Gamma = \frac{f}{F}$, где f — расстояние от линзы до изображения предмета.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие вы знаете виды линз?
2. Какие линзы называют собирающими, а какие — рассеивающими? С чем связаны эти названия?
3. На линзу падают лучи, исходящие из одной точки. Как будут идти эти лучи после преломления в линзе?
4. Какими лучами удобно пользоваться для построения изображения точки в линзе? Почему часто выбирают именно эти лучи?
5. Чем отличаются действительные изображения от мнимых? Какие из этих изображений можно получить на экране?
6. Что такое фокусное расстояние и оптическая сила линзы? Как эти величины связаны друг с другом?
7. Что такое увеличение линзы? Когда линза дает особенно большое увеличение? Чему оно равно в этом случае?
8. При выжигании линзу держат на расстоянии 25 см от дощечки. Какова оптическая сила линзы?
- 9*. Постройте изображение точки, находящейся на двойном фокусном расстоянии от собирающей линзы. Каким будет это изображение?
- 10*. На каком расстоянии от собирающей линзы нужно поместить предмет, чтобы его изображение было действительным?
- 11*. Постройте изображение точки в рассеивающей линзе и определите, является оно увеличенным или уменьшенным.

§ 15. ГЛАЗ И ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1. Глаз
2. Оптические приборы

Мы рассмотрим здесь строение глаза и расскажем, как исправляют дефекты зрения — дальновзоркость и близорукость. Будет рассмотрено также устройство оптических приборов: фотоаппарата, лупы, микроскопа и телескопа.

1. ГЛАЗ

СТРОЕНИЕ ГЛАЗА

Замечательным «оптическим прибором» является созданный природой в процессе эволюции глаз человека. На рис. 15.1 схематически изображено строение глаза.

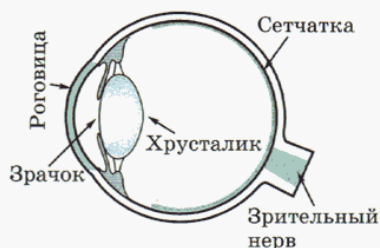


Рис. 15.1. Строение глаза

Роль собирающей линзы выполняют роговица и хрусталик. С их помощью на сетчатке получается действительное уменьшенное и перевернутое изображение предметов. Мозг автоматически «переворачивает» изображение еще раз, поэтому мы воспринимаем предметы неперевернутыми.

Преломление света происходит в основном на внешней поверхности роговицы.

«Наводка на резкость» производится затем хрусталиком: при рассматривании близких предметов хрусталик утолщается, вследствие чего его фокусное расстояние уменьшается. Эту «автоподстройку» глаза называют *аккомодацией*¹.

Существует, однако, *предел аккомодации*, из-за которого не удастся хорошо рассмотреть предмет, расположенный ближе 10—15 см от глаза.

Самое удобное расстояние для рассматривания людьми, не имеющими дефектов зрения, — примерно 25 см. Это расстояние называют *расстоянием наилучшего зрения*.

Расслабленный глаз «настроен на бесконечность», то есть на рассматривание удаленных предметов. Поэтому при чтении или

¹ Некоторые ученые считают, что аккомодация происходит также вследствие изменения формы самого глаза (глазного яблока).

при работе за компьютером не забывайте давать глазам передышку: время от времени смотрите вдаль, лучше всего — в окно. Это помогает также осмыслить прочитанное.

ИСПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ЗРЕНИЯ

Дальнозоркость

Вы, наверное, замечали, что многие люди в возрасте старше 40—45 лет, рассматривая без очков небольшой предмет или пытаясь прочесть мелкий текст, отодвигают его подальше. Такой недостаток зрения называют *дальнозоркостью*¹.

Причина дальнозоркости в том, что эластичность хрусталика с возрастом уменьшается. И даже при максимальном напряжении мышцы, охватывающей хрусталик (когда его фокусное расстояние минимально возможное), он не может сфокусировать на сетчатке изображение предмета, находящегося на расстоянии наилучшего зрения: изображение оказывается за сетчаткой (рис. 15.2, а).

В этом случае помогают очки с *собирающими линзами* (рис. 15.2, б).



Рис. 15.2. Дальнозоркость (а) и ее исправление (б)

Собирающая линза помогает глазу сфокусировать на сетчатке лучи от близко расположенных предметов.

Близорукость

Весьма распространен (в любом возрасте) и противоположный недостаток зрения, когда человек хорошо видит близкие предметы, но плохо различает удаленные.

Чтобы хорошенько рассмотреть предмет, человек подносит его *руками близко* к глазам, поэтому такой недостаток зрения назвали *близорукостью*.

¹ Это не совсем точное название для *недостатка* зрения: у несведущего оно может вызывать даже представление, что это не недостаток, а преимущество, выражающееся в том, что дальнозоркий человек очень хорошо видит удаленные предметы. На самом же деле человеку, страдающему дальнозоркостью, часто приходится пользоваться очками и для рассматривания удаленных предметов — правда, более слабыми. Поэтому у ваших бабушек и дедушек есть, наверное, отдельные очки для чтения и для дали.

В близорукости «виноват» обычно не хрусталик, а форма глаза — он чрезмерно вытянут в длину, вследствие чего сетчатка находится слишком далеко от хрусталика. По этой причине лучи, исходящие от удаленных предметов, фокусируются хрусталиком не на сетчатке, а перед ней (рис. 15.3, а).

В этом случае прописывают очки с *рассеивающими* линзами (рис. 15.3, б).

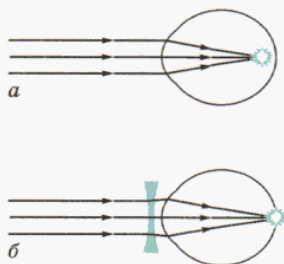


Рис. 15.3. Близорукость (а) и ее исправление (б)

При использовании рассеивающей линзы изображение удаленных предметов «отодвигается» от хрусталика как раз настолько, что попадает на сетчатку.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

ЧЕМ ФОТОАППАРАТ ПОХОЖ НА ГЛАЗ И ЧЕМ ОНИ ОТЛИЧАЮТСЯ?

На рис. 15.4 схематически изображено устройство фотоаппарата. Легко заметить, что оно напоминает строение глаза.



Рис. 15.4. Схематическое устройство фотоаппарата

Роль роговицы и хрусталика играет объектив, а роль сетчатки — светочувствительная пленка или матрица (в цифровых фотоаппаратах).

Существенным отличием фотоаппарата от глаза является способ наводки на резкость: в фотоаппарате она производится обычно не с помощью изменения фокусного расстояния объектива, а с помощью изменения расстояния от объектива до пленки.

Однако в последнее время появились фотоаппараты, в которых может плавно изменяться также фокусное расстояние объектива.

КОГДА ПРЕДМЕТ ВИДИТСЯ БОЛЬШИМ?

Оптические приборы часто используют для «увеличения» или «приближения» предметов (например, лупу, микроскоп и телескоп). Общее у всех этих приборов то, что при их использовании

рассматриваемый предмет видится значительно бóльшим, чем когда его рассматривают невооруженным глазом.

От чего же зависит видимый размер предмета?

Он определяется размером *изображения предмета на сетчатке глаза*. А размер этого изображения определяется так называемым «*углом зрения*», то есть углом между лучами, идущими в глаз от крайних точек предмета (рис. 15.5).

Когда предмет приближается к глазу, угол зрения увеличивается, вследствие чего увеличивается и видимый размер предмета.

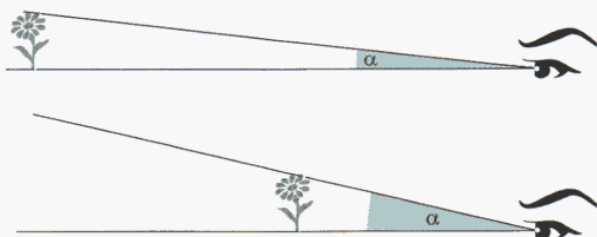


Рис. 15.5. Увеличение угла зрения при приближении предмета

Таким образом, если назначение оптического прибора состоит в том, чтобы увеличить размер изображения на сетчатке, то этот прибор должен *увеличивать угол зрения*.

КАК ПРАВИЛЬНО ПОЛЬЗОВАТЬСЯ ЛУПОЙ?

Чтобы увеличить видимый размер предмета без использования оптических приборов, его подносят как можно ближе к глазу, чтобы увеличить угол зрения. Однако рассмотреть предмет, расположенный *слишком* близко, мешает предел аккомодации: оптическая система глаза не дает на сетчатке четкого изображения предмета, расположенного ближе 10—15 см.

К тому же для рассматривания близко расположенного предмета приходится сильно напрягать глаз: наиболее удобным для рассматривания является расстояние наилучшего зрения $d_0 = 25$ см.

Однако природу можно «перехитрить», если рассматривать близкий предмет через собирающую линзу с фокусным расстоянием F *меньшим*, чем расстояние наилучшего зрения. Такую линзу называют *лупой*. Обычно в качестве лупы применяют собирающие линзы с фокусным расстоянием от 1 до 15 см.

Мы сейчас увидим, что при использовании лупы предмет рассматривают как бы с расстояния, равного фокусному расстоянию лупы.

Чтобы найти увеличение лупы, надо определить, во сколько раз увеличивается угол зрения по сравнению с рассматриванием того же предмета с расстояния наилучшего зрения d_0 .

Предмет высотой h при рассматривании с расстояния d_0 виден под углом, приближенно¹ равным $\alpha_0 = \frac{h}{d_0}$ (рис. 15.6, а). А если рассматривать этот предмет через лупу, поместив его чуть ближе фокуса, угол зрения станет равным $\alpha = \frac{h}{F}$ (рис. 15.6, б).

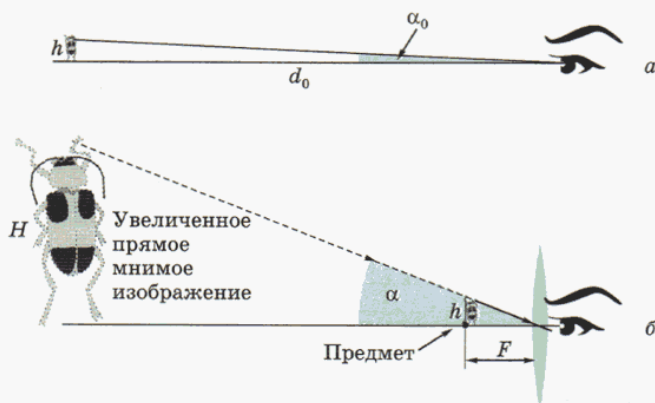


Рис. 15.6. Рассматривание небольшого предмета:
а — невооруженным глазом; б — с помощью лупы

Таким образом, при рассматривании предмета через лупу угол зрения увеличивается в $\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{d_0}{F}$ раз, то есть увеличение лупы равно $\frac{d_0}{F}$. Например, при использовании в качестве лупы линзы с фокусным расстоянием 2,5 см увеличение равно $25 : 2,5 = 10$.

Чтобы получить с помощью лупы максимально возможное увеличение и при этом не напрягать глаз, надо *держат лупу близко к глазу, а предмет располагать вблизи ее фокуса*.

Именно так и пользуются лупой профессионалы — часовщики, ювелиры, натуралисты.

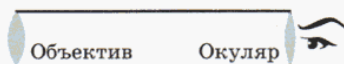
КАК УСТРОЕН МИКРОСКОП?

Задача микроскопа такая же, как и лупы, — *увеличить угол зрения*. Однако в микроскопе увеличение происходит *дважды*, благодаря чему можно получить намного большее увеличение, чем с помощью лупы. На рис. 15.7 приведена схема микроскопа.

¹ Для малых углов их синусы и тангенсы можно приближенно заменять значениями самих углов в радианной мере.

Рис. 15.7. Схема микроскопа

Окуляр играет роль лупы, через которую рассматривают увеличенное изображение, полученное с помощью объектива.



Увеличение микроскопа равно *произведению* увеличений, даваемых объективом и окуляром. Хороший объектив дает увеличение до 100, окуляр же дает увеличение до 20 раз. Следовательно, микроскоп может давать увеличение до $100 \cdot 20 = 2000$ раз.

Благодаря микроскопу ученые получили возможность изучать структуру материалов, клетки растений и бактерии. Но увеличения микроскопа недостаточно, чтобы увидеть вирусы.

Однако сделать еще *бóльшим* увеличение, даваемое оптическим микроскопом, невозможно. Это обусловлено *волновой природой света*: в оптический микроскоп нельзя рассмотреть предметы, размеры которых меньше или порядка длины волны света, то есть меньше примерно одной тысячной доли миллиметра.

Но это не остановило ученых на пути вглубь материи. Они изобрели такие микроскопы, в которых роль света играют пучки электронов и ионов (*электронные и ионные микроскопы*).

Ионные микроскопы позволяют увидеть отдельные *атомы*, но еще глубже заглянуть в строение вещества удалось с помощью ускорителей элементарных частиц. Благодаря им ученые узнали даже, как устроены *атомные ядра*, а ведь размер ядра в миллиарды раз меньше размеров, доступных оптическому микроскопу! Более подробно мы расскажем об этом в *главе 6. Атомное ядро и элементарные частицы*.

КАК УСТРОЕН ТЕЛЕСКОП?

Задача телескопа — тоже *увеличить угол зрения*, но на этот раз при рассматривании *удаленных* предметов.

На рис. 15.8 приведена схема телескопа.

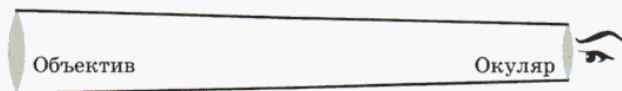


Рис. 15.8. Схема телескопа

Окуляр играет роль лупы, через которую рассматривают изображение, полученное с помощью объектива.

Изображение удаленного предмета находится вблизи *фокуса* объектива телескопа, и чем больше фокусное расстояние объектива, тем *бóльшим* будет изображение предмета. С помощью геомет-

рического построения можно доказать, что размер удаленного изображения пропорционален фокусному расстоянию объектива. Поэтому объектив телескопа, в отличие от объектива микроскопа, должен иметь *большое* фокусное расстояние.

Согласно расчетам получаемое с помощью телескопа увеличение угла зрения равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра. Так, если фокусное расстояние объектива 1 м, а фокусное расстояние окуляра 1 см, угол зрения увеличивается в 100 раз.

Хорошие телескопы увеличивают угол зрения в тысячи раз.

Объектив телескопа должен иметь также большой *радиус*: при наблюдении через телескоп в глаз попадает во столько раз больше света, во сколько раз площадь объектива больше площади зрачка. Поэтому можно сказать, что объектив телескопа — это как бы гигантский зрачок, направленный в небо.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите строение глаза.
2. Что такое дальнозоркость и близорукость? Какие линзы используют для исправления каждого из этих дефектов зрения?
3. Что общего в строении глаза и в устройстве фотоаппарата? Чем отличаются в них способы наводки на резкость?
4. Что общего у всех оптических приборов, которые увеличивают или приближают?
5. Как правильно пользоваться лупой? Чему равно ее увеличение?
- 6*. Опишите принцип действия микроскопа.
- 7*. Опишите принцип действия телескопа.
- 8*. Посмотрите в окно мимо карандаша, держа его на расстоянии наилучшего зрения от глаза. Почему мы видим четко или карандаш, или предметы за окном? В каком случае фокусное расстояние хрусталика больше?
- 9*. Что мы видим под большим углом зрения: Солнце или Луну? Какое физическое явление дает «прямой» ответ на этот вопрос?
- 10*. Чему равно фокусное расстояние лупы, которая дает 4-кратное увеличение?

§ 16. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

1. Интерференция света
2. Дифракция света
3. Соотношение между волновой и геометрической оптикой

Мы расскажем здесь, как и при каких условиях проявляются волновые свойства света.

Будет рассмотрено также соотношение между волновой и геометрической оптикой.

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

НАЛОЖЕНИЕ ВОЛН

В начале 19-го века английский ученый Томас Юнг¹ поставил опыт, в котором отчетливо проявилась волновая природа света.

Свет, пропущенный через узкую щель, падал на две близко расположенные щели, за которыми находился экран. И на экране вместо ожидаемых двух светлых полос появлялись *чередующиеся* цветные полосы (рис. 16.1 и рисунок на форзаце).



Томас Юнг
(1773—1829)

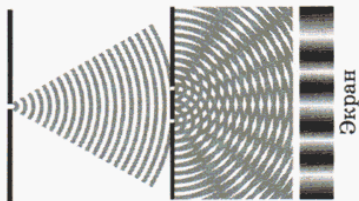


Рис. 16.1. Опыт Юнга с двумя щелями

Свой опыт Юнг объяснил с помощью *волновой теории света*. Согласно этой теории световые волны, прошедшие через различные щели, *накладываются* друг на друга. Вследствие этого в тех точках пространства, куда волны, прошедшие через щели, прихо-

¹ Томас Юнг был удивительным человеком: он был не только одним из лучших физиков своего времени, но еще и расшифровывал египетские иероглифы, лечил людей, исследовал механизм зрения, был ловким наездником и даже... акробатом и канатоходцем! Он играл почти на всех музыкальных инструментах и еще в юности изучил самостоятельно больше десяти языков. Его девизом было: «Если это может кто-то, то это смогу и я!»

дят в *одинаковой фазе*, то есть когда максимум одной волны совпадает с максимумом другой, они взаимно усиливают друг друга (рис. 16.2). А в тех точках пространства, куда волны приходят в *противофазе*, то есть когда максимум одной волны накладывается на минимум другой, они взаимно гасят друг друга (рис. 16.3). В результате такого наложения волн и возникает чередование полос на экране.

Ниже мы объясним, почему эти полосы оказываются *цветными* (см. также § 17. *Цвет*).

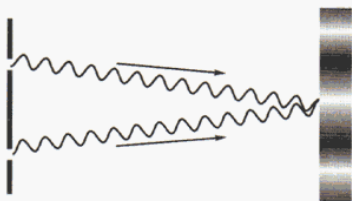


Рис. 16.2. Если волны приходят в данную точку экрана в одинаковой фазе, они взаимно усиливают друг друга

На экране в этом месте наблюдается светлая полоса.

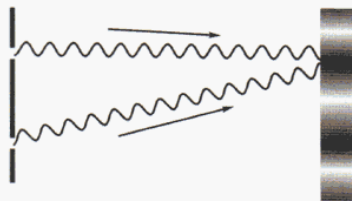


Рис. 16.3. Если волны приходят в данную точку экрана в противофазе, они взаимно ослабляют друг друга

На экране в этом месте наблюдается темная полоса.

Открытое им явление наложения волн Юнг назвал *интерференцией*¹ волн.

Особенно ярко интерференция волн проявляется тогда, когда складываются волны с *одинаковой длиной волны и примерно одинаковой амплитудой*. При наложении таких волн в одних областях пространства волны *все время* усиливают друг друга, а в других — *все время* ослабляют друг друга практически до полного взаимного гашения. Таким образом, в некоторых точках пространства *один свет может погасить другой свет!* Этот вывод показался сначала настолько странным, что далеко не все ученые — современники Юнга — приняли его объяснение.

Однако сегодня уже ни у кого не вызывает сомнения, что *явление интерференции свидетельствует о волновой природе света*: для потоков частиц взаимного гашения быть не может.

Длины световых волн

Объясним теперь, почему полосы на экране в описанном опыте Юнга оказываются *цветными*.

¹ От латинских слов *inter* — между, взаимно и *ferens* — несущий, переносящий.

Дело в том, что *каждому цвету соответствует своя длина волны* (подробнее об этом рассказано в § 17. Цвет), и поэтому волны разной длины усиливают (или гасят) друг друга в *разных* точках.

Анализируя результаты своего опыта, Юнг смог по расположению цветных полос на экране измерить длину световых волн, соответствующих каждому цвету.

Когда выяснилось, что длины световых волн меньше одной тысячной доли миллиметра, стало понятно, почему волновая природа света проявляется так редко. Ведь ее можно обнаружить только тогда, когда для этого созданы особые условия.

Остановимся на этом подробнее.

Условие интерференции

При рассмотрении опыта Юнга может возникнуть вопрос: почему для того, чтобы наблюдать интерференцию света на *двух* щелях, надо было предварительно пропустить свет через *одну* щель? А ведь это на самом деле и было главной «изюминкой» опыта!

Дело в том, что устойчивая интерференционная картина возникает только в том случае, когда складываются волны *с одинаковой длиной волны и согласованные по фазе* — например, находящиеся все время в одинаковой фазе или в противофазе. Такие «согласованные» волны называют *когерентными*¹.

Световые волны, испущенные *различными* источниками света, не являются когерентными, потому что свет испускается атомами в виде сравнительно коротких «порций» волн, не согласованных друг с другом. Поэтому интерференцию световых волн, испущенных различными источниками, наблюдать не удастся.

Однако ее можно наблюдать при наложении волн, испущенных *одним источником света*, разделяя свет на *два пучка*. И первая щель в опыте Юнга играет роль одного источника, свет которого разделяется затем двумя щелями на два пучка, при наложении которых и возникает интерференционная картина.

«КОЛЬЦА НЬЮТОНА»

По иронии судьбы опыт, в котором особенно ярко проявилась волновая природа света, поставил сам Исаак Ньютон, создатель корпускулярной теории света. И было это примерно за сто лет до рождения Томаса Юнга — во второй половине 17-го века.

Направляя свет вертикально вниз на лежащую на стекле линзу, Ньютон наблюдал в отраженном свете отчетливые цветные

¹ От латинского *cohaerens* — связанный.

кольца, названные впоследствии «кольцами Ньютона» (рис. 16.4, а также рисунок на форзаце).

Сам Ньютон не смог объяснить природу «колец Ньютона»: в рамках построенной им корпускулярной теории света этому опыту просто нет объяснения, так как он *противоречит* корпускулярной теории! Но Ньютон был настолько убежден в справедливости своей теории света, что даже поставленный им самим опыт не смог поколебать этой уверенности.

Объяснить «кольца Ньютона» долгое время не удавалось никому из ученых, хотя этот простой и красивый опыт с успехом повторяли больше ста лет!

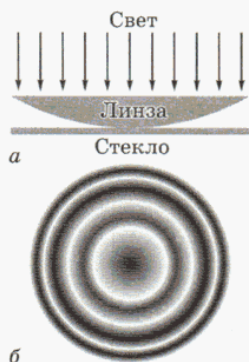


Рис. 16.4. «Кольца Ньютона»: а — схема опыта; б — наблюдаемые в отраженном свете кольца

Томас Юнг объяснил «кольца Ньютона» наложением световых волн, отраженных от нижней поверхности линзы и лежащего под линзой стекла. Там, где волны усиливают друг друга, наблюдаются светлые кольца, а там, где они гасят друг друга, — темные кольца.

Разгадку «колец Ньютона» нашел Томас Юнг в начале 19-го века. Он догадался, что «кольца Ньютона» — это результат *интерференции световых волн*, отраженных от нижней поверхности линзы и поверхности лежащего под линзой стекла.

Как мы увидим ниже (см. § 17. Цвет), такова же физическая причина появления, например, радужной окраски мыльных пузырей и крыльев насекомых.

2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

ОПЫТ ГРИМАЛЬДИ

В середине 17-го века итальянский ученый Франческа Мария Гримальди наблюдал странные тени от небольших предметов, помещенных в очень узкий пучок света. К удивлению ученого, эти тени не имели резких границ, а были почему-то окаймлены цветными полосами.

Опыт Гримальди несложно повторить. На рис. 16.5 в качестве примера изображена тень волоса, освещенного тонким пучком света. Хорошо видны окаймляющие тень полосы.

Этот опыт показывает, что вблизи краев препятствий свет отклоняется от прямолинейного распространения.

Отклонение света от прямолинейного распространения и огибание им препятствий Гримальди назвал *дифракцией*¹.

Он догадался, что явление дифракции указывает на *волновую природу света*, но построить теорию дифракции ему не удалось.

Это сделал на основе волновой теории света французский ученый Огюстен Френель² в начале 19-го века. Он и явился продолжателем Гюйгенса в развитии этой теории.



Огюстен Жан Френель
(1788—1827)

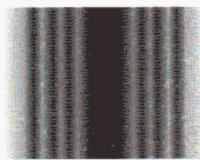


Рис. 16.5. Полосы, окаймляющие тень от волоса, появляются вследствие дифракции света

3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВОЛНОВОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКОЙ

ФРОНТ ВОЛНЫ

Одно из основных понятий волновой теории — *фронт волны*. Оно играет в волновой теории света такую же важную роль, как понятие светового луча в геометрической оптике.

Волновой фронт — это совокупность точек пространства, до которых в данный момент дошла волна.

В качестве примера на рис. 16.6 слева изображен фронт волны, испущенной точечным источником. Такие волны называют *сферическими*. На большом (по сравнению с длиной волны) рас-

¹ В переводе с латинского это означает «преломление», что не совсем удачно, так как преломлением называют изменение хода луча света при переходе из одной среды в другую.

² Френель был по профессии инженером и самостоятельные исследования по оптике начал во время вынужденного отпуска, когда его уволили со службы за то, что он добровольцем присоединился к войскам, которые хотели преградить дорогу Наполеону, возвращавшемуся с острова Эльба. Будучи самоучкой, Френель сделал крупнейшие открытия, за что был избран членом Французской академии.

стоянии от источника участок сферического фронта можно приближенно рассматривать как часть плоскости (рис. 16.6 справа). Такую волну называют *плоской*.

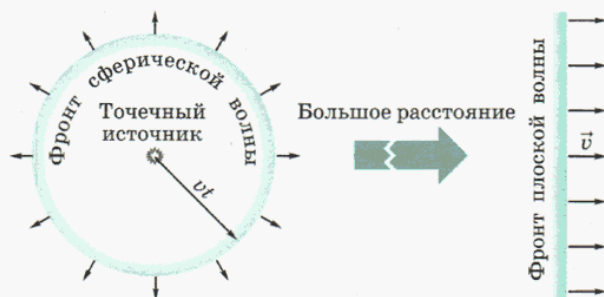


Рис. 16.6. Фронт сферической и плоской волны. Скорость волны равна v , направление распространения волны показано стрелками

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

Чтобы объяснить законы отражения и преломления света с помощью волновой теории, Гюйгенс предположил, что

каждая точка фронта световой волны сама становится источником вторичных сферических волн (рис. 16.7).

Это положение называют *принципом Гюйгенса*.

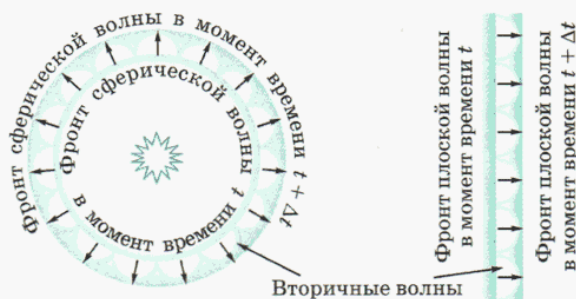


Рис. 16.7. Изменение волнового фронта со временем для сферической и плоской волны

Зная положение волнового фронта в некоторый момент времени t , можно с помощью принципа Гюйгенса найти положение волнового фронта через небольшой промежуток времени Δt ,

построив поверхность, касающуюся фронтов сферических вторичных волн в момент времени $t + \Delta t$.

Как это делается, схематически изображено на рис. 16.7.

КАК ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ ОБЪЯСНЯЕТ ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА?

С помощью принципа Гюйгенса можно объяснить и преломление света на границе раздела двух прозрачных сред, если скорость света в этих средах *различна*.

Рассмотрим случай, когда плоская волна падает под углом на границу раздела двух сред.

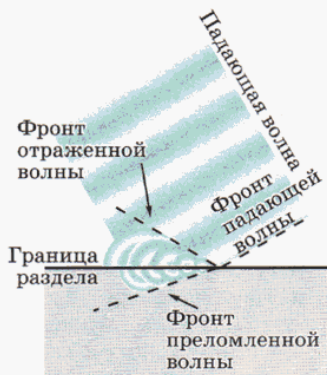
Согласно принципу Гюйгенса каждая точка этой границы сама становится источником сферических волн, причем эти волны распространяются в *обе* стороны от границы раздела (рис. 16.8).

Волны, идущие во вторую среду, формируют *преломленную* плоскую волну, а волны, возвращающиеся в первую среду, формируют *отраженную* плоскую волну.

Таким образом, принцип Гюйгенса убедительно объясняет, почему наряду с *преломлением* света всегда присутствует и *отражение* света.

Рис. 16.8. Объяснение отражения и преломления света согласно волновой теории

Каждая точка границы раздела двух сред является источником сферических волн, распространяющихся в обе стороны от границы раздела. На рисунке изображен случай, когда скорость света во второй среде (нижней на рисунке) меньше, чем в первой.



Используя несложные геометрические построения, можно доказать, что фронт отраженной волны образует такой же угол с плоскостью раздела двух сред, что и фронт падающей волны.

Отсюда следует уже знакомый вам закон отражения: угол отражения равен углу падения.

Рассмотрим теперь преломленную волну.

Предположим, что скорость света во второй среде меньше, чем в первой (на рис. 16.8 изображен как раз такой случай). Мы видим, что при этом фронт падающей волны составляет больший

угол с поверхностью раздела сред, чем фронт преломленной волны. Поскольку фронт волны перпендикулярен направлению распространения света, углы между фронтом каждой волны и поверхностью раздела сред равны соответственно углам падения и преломления. Значит, в данном случае угол преломления *меньше* угла падения.

Расчеты показывают, что отношение *синусов* этих углов равно отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде. А так как для двух данных сред это отношение *постоянно*, отсюда следует уже знакомый вам закон преломления: отношение синусов углов падения и преломления постоянно.

Итак, волновая теория света не только объясняет законы отражения и преломления света, но и раскрывает

физический смысл показателя преломления: он равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в данной среде: $n = \frac{c}{v}$.

Таким образом,

законы геометрической оптики являются следствиями волновой теории света в случае, когда длина световой волны намного меньше размеров препятствий.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называют интерференцией волн?
2. Опишите опыт Юнга с двумя щелями. Объясните качественно результат этого опыта в рамках волновой теории света.
3. Что такое интерференционный максимум? минимум?
4. Почему интерференцию световых волн можно наблюдать только для волн, испущенных одним и тем же источником света?
5. Опишите опыт с «кольцами Ньютона».
6. Что называют дифракцией света?
7. Опишите опыты Гримальди, в которых впервые наблюдалась дифракция света.
8. Что такое фронт волны?
- 9*. Как формулируется принцип Гюйгенса? Как с помощью этого принципа можно найти новое положение фронта волны?
- 10*. Как волновая теория света объясняет отражение и преломление света? Каков физический смысл показателя преломления?
- 11*. Следуют ли законы геометрической оптики из волновой теории света?

§ 17. ЦВЕТ

1. Дисперсия света
2. Как глаз различает цвета
3. Окраска предметов
4. Невидимые лучи

Окружающий нас мир играет красками: нас радует и волнует голубизна неба, зелень травы и деревьев, красное зарево заката, семицветная дуга радуги.

В этом параграфе мы рассмотрим, чем обусловлена окраска предметов и как глаз различает цвета.

1. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА В ЦВЕТНОЙ СПЕКТР

Первый шаг к разгадке цвета сделал Исаак Ньютон, когда он был еще юным выпускником Кембриджского университета. Прodelав маленькое отверстие в оконной ставне, он подставил под пучок солнечного света треугольную стеклянную призму, и на противоположной стене заиграли все цвета радуги: *красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый*¹. Эту цветную полосу Ньютон назвал *спектром*².

Разложение белого света в цветной спектр означает, что *белый свет является составным*, то есть представляет собой смесь всех цветов радуги. Когда пучок белого света проходит через призму, составляющие его лучи разных цветов преломляются *по-разному*: сильнее всего преломляются фиолетовые лучи, а слабее — красные. В результате и получается цветной спектр (рис. 17.1, а также рисунок на форзаце).

Рис. 17.1. Разложение белого света в спектр с помощью призмы



ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Каждый цвет радуги характеризуется своим диапазоном длин волн света. Наибольшая длина волны соответствует красному цвету (760 нм), а наименьшая — фиолетовому (380 нм).

¹ В предложении «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан» первые буквы слов совпадают с первыми буквами названий цветов в радуге.

² От латинского *spectrum* — видимое.

Из того факта, что лучи разных цветов преломляются в стекле по-разному, следует вывод, что *показатель преломления вещества зависит от длины световой волны*.

Зависимость показателя преломления света от длины волны называют дисперсией¹ света.

У воды и многих сортов стекла показатель преломления для фиолетового света больше, чем для красного, — поэтому фиолетовые лучи и отклоняются призмой сильнее, чем красные.

2. КАК ГЛАЗ РАЗЛИЧАЕТ ЦВЕТА

На сетчатке глаза расположены светочувствительные элементы, называемые «палочками» и «колбочками».

Все палочки — одного типа: они различают только степень освещенности, зато колбочек существует три типа. Условно назовем их «красными», «зелеными» и «синими», так как «красные» колбочки наиболее чувствительны к красному цвету, «зеленые» — к зеленому, а «синие» — к синему.

Все многообразие видимых нами цветов обусловлено сигналами, посылаемыми в мозг всего *тремя* типами колбочек. При определенном соотношении интенсивности этих сигналов (как раз таким, какое возникает при попадании в глаз солнечного света) свет будет казаться *белым*. Во всех других случаях свет будет иметь окраску. Так, если в мозг идут сигналы только от «синих» колбочек, свет будет казаться синим, а если, например, только от «красных» и «зеленых» палочек — то желтым.

Сколько цветов на экране телевизора и дисплее компьютера?

Свойство глаза «раскладывать» все цвета на красный, зеленый и синий используют при разработке цветных телевизоров и мониторов (дисплеев) компьютеров.

Чтобы увидеть, каковы цвета на экране на самом деле, нанесите на экран капельку воды: она будет играть роль маленькой, но довольно сильной линзы. С ее помощью вы увидите, что *любое* цветное изображение состоит из светящихся точек всего *трех* цветов — красных, зеленых и синих — как раз тех, к которым наиболее чувствительны различные типы колбочек в глазу. И там, где на экране белый цвет, эти три точки будут иметь примерно одинаковую яркость. А там, где цвет на экране желтый, вы увидите только красную и зеленую точки. Смешение цветов на экране телевизора схематически изображено на форзаце.

¹ От латинского *dispersio* — рассеяние.

3. ОКРАСКА ПРЕДМЕТОВ

Почему листья зеленые, а кровь — красная?

Пусть белый (например, солнечный) свет падает на предмет, который поглощает «красные» лучи, а все остальные — отражает. Такое поглощение световых волн определенной длины называют *избирательным поглощением*.

Какого же цвета будет свет, отраженный от этого предмета?

В нем будет не хватать красной части спектра, и поэтому он будет восприниматься глазом как зеленоватый.

Зеленый цвет листьям растений придает хлорофилл — органическое соединение, «ответственное» за фотосинтез (превращение солнечной энергии в химическую энергию органических веществ). Хлорофилл поглощает преимущественно красные и синие лучи. В результате отраженный от листа растения «остаток» солнечного спектра приобретает зеленую окраску.

А кровь обязана своим красным цветом гемоглобину. По своей химической структуре он подобен хлорофиллу, за исключением того, что «главным» атомом является в нем атом железа. Но эта «маленькая замена» кардинально меняет цвет: гемоглобин не поглощает красного света, поэтому кровь — красная¹.

Как возникает радуга?

После дождя в воздухе остается много мельчайших капелек воды, имеющих форму шара. Когда луч света падает на такую капельку, он преломляется на поверхности капельки, затем отражается от ее внутренней поверхности и при выходе из воды в воздух преломляется еще раз².

При этом вследствие дисперсии лучи, соответствующие различным цветам, преломляются *по-разному* (рис. 17.2 и рисунок на форзаце).

В результате, выйдя из капли, красный луч пойдет под одним углом, а фиолетовый — под другим. Следовательно, в глаз наблюдателя красный и фиолетовый лучи попадут из *разных* капель (рис. 17.3 и рисунок на форзаце).

Все «красные» капли наблюдатель будет видеть *под одним и тем же углом*, поэтому они будут казаться ему расположенными на *дуге окружности*, вследствие чего эта дуга будет окрашена в красный цвет. «Оранжевые» капли наблюдатель увидит на сосед-

¹ А у осьминогов и кальмаров кровь голубая, потому что она содержит гемоглобин, в котором «главным» атомом является атом меди.

² Это только один из возможных путей луча света.

ней дуге меньшего радиуса и так далее — вплоть до капель, образующих фиолетовую дугу, расположенную *внутри* всех остальных цветных дуг.

Так и возникает радуга (см. фотографию радуги на форзаце).

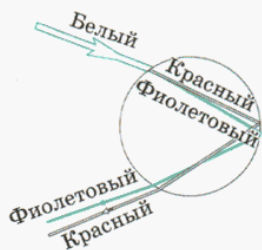


Рис. 17.2. Ход красного и фиолетового лучей при прохождении луча солнечного света сквозь капельку воды

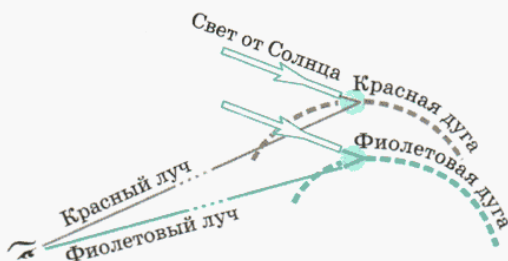


Рис. 17.3. Как образуется радуга

Почему мыльные пузыри кажутся разноцветными?

Ответ на этот вопрос нашел Томас Юнг.

Он догадался, что при отражении света от тонкой пленки происходит *интерференция* волн, отраженных двумя ее поверхностями (рис. 17.4).

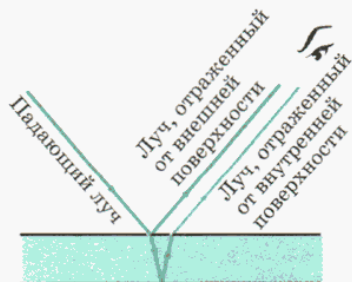


Рис. 17.4. Возникновение цветов тонких пленок вследствие интерференции волн, отраженных от различных поверхностей пленки

Для наглядности толщина пленки на рисунке многократно увеличена.

Свет от разных точек пленки попадает в глаз наблюдателю, отразившись под разными углами. Кроме того, толщина пленки в разных местах различна. Поэтому условия интерференционного усиления волн различной длины, соответствующих *различным цветам*, будут *различны для разных точек пленки*: в одной точке будет происходить взаимное усиление красных волн, вследствие чего эта точка будет видаться наблюдателю красной, а в соседней точке будет происходить взаимное усиление для оранжевых волн и так далее.

В результате при отражении *белого* света от тонкой пленки происходит разделение белого света на составляющие его цвета радуги, то есть возникает радужная окраска.

Интерференцией света обусловлена и радужная окраска крыльев насекомых (на самом деле эти крылья просто прозрачные и очень тонкие).

Почему небо голубое, а закат — красный?

Мы смотрим на небо со дна окружающего Землю воздушного океана. Солнечные лучи рассеиваются на микроскопических неоднородностях атмосферы, в частности, на случайных скоплениях молекул. При этом оказывается, что волны, соответствующие фиолетовому и синему цветам, рассеиваются сильнее других волн. Это и приводит к тому, что Солнце кажется нам желтоватым, а небо — голубым (рис. 17.5).

Рис. 17.5. Синий цвет «вычитается» из белого света Солнца, поэтому оно кажется нам слегка желтоватым. Но синие лучи солнечного спектра не пропадают: они попадают в наши глаза со всего неба, многократно рассеявшись в атмосфере. Это и придает небу голубой цвет



Космонавты же рассказывают, что из космоса видно ослепительно *белое* Солнце на совершенно *черном* небе.

4. НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В 1800 году английский астроном Уильям Гершель, помещая чувствительный термометр в разные части спектра, заметил, что при приближении к *красному* концу спектра показания термометра *повышаются*.

Тогда ученый решил поместить термометр за *красной границей спектра* — и показания термометра увеличились еще больше! Хотя за красной границей спектра глаз «видел» только отсутствие света, прибор явно указывал на наличие излучения.

Так было открыто *инфракрасное*¹ излучение, то есть электромагнитное излучение с длинами волн меньшими, чем у видимого света: от 0,8 мкм до 1—2 мм.

«Полезно сомневаться в общепринятых вещах», — заметил Гершель, рассказывая о своем открытии.

Инфракрасные волны излучаются нагретыми телами, поэтому инфракрасное излучение называют иногда *тепловым*. На него приходится около половины энергии солнечного излучения.

Человек не видит инфракрасное излучение, но ощущает «тепловые лучи» кожей и всем организмом — именно инфракрасное излучение вызывает перегрев организма.

Инфракрасное излучение используют при аэрофотосъемке, а также в бытовой технике, например в пультах дистанционного управления.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Вскоре после открытия Гершелем инфракрасного излучения немецкий ученый Иоганн Риттер решил исследовать *химическое* действие различных участков спектра. Для этого ученый использовал хлористое серебро, которое под действием света чернеет.

Выяснилось, что химическое действие различных частей спектра как бы противоположно тепловому: почернение серебра увеличивалось при приближении к *фиолетовому* концу спектра.

Тогда Риттер решил выйти за *фиолетовую* границу видимого спектра — и почернение серебра оказалось тут еще большим, чем в видимой части спектра!

Так было открыто *ультрафиолетовое*² излучение, то есть электромагнитное излучение с длинами волн большими, чем у видимого света: от 10^{-8} до $4 \cdot 10^{-7}$ м.

¹ От латинского *infra* — ниже, под.

² От латинского *ultra* — сверх.

Ультрафиолетовое излучение разрушает сложные биологические молекулы и поэтому в больших дозах губительно действует на все живое. К счастью, оно сильно поглощается атмосферой.

В небольших дозах ультрафиолетовое излучение не только полезно, но даже необходимо. Например, витамин D, необходимый для нормального роста костей, вырабатывается в организме только под воздействием ультрафиолетовых лучей. Поэтому детям так важно бывать в солнечную погоду на улице: внутрь помещения через оконные стекла ультрафиолетовые лучи практически не проникают.

ПОЧЕМУ МЫ ВИДИМ ТАКОЙ УЗКИЙ УЧАСТОК СПЕКТРА?

Диапазон волн *видимого* света составляет лишь крошечную часть диапазона волн, приходящихся на инфракрасное и ультрафиолетовое излучение (см. рисунок на форзаце). Почему же природа «оставила» нам такое узкое «окошко» для видения?

Сегодня известны несколько причин этого. Во-первых, именно на видимую часть спектра приходится максимум солнечного излучения. Во-вторых, на эту же часть спектра приходится максимум прозрачности земной атмосферы.

И наконец, если бы природа «подарила» нам более широкий диапазон видимого света, мы видели бы предметы *нечеткими*. Дело в том, что вследствие дисперсии изображение на сетчатке, даваемое оптической системой глаза, будет четким только для сравнительно узкого диапазона световых волн.

Так что можно подивиться мудрости природы: в процессе эволюции она заботливо «подобрала» нам такое «окошко», через которое мы можем *четко* увидеть как можно *больше*.

А то, что не видно невооруженным глазом, мы научились видеть с помощью специальных приборов: вспомните, как ученые «заглянули» за красную и фиолетовую границу спектра, открыв инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Благодаря «инфракрасной» съемке удалось увидеть ядро нашей Галактики, скрытое непрозрачными для видимого света облаками межзвездной пыли (см. § 34. *Галактики*).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите опыт Ньютона по разложению белого света в спектр.
2. Почему Ньютон сделал из своего опыта вывод, что белый свет является составным?
3. Пропуская через призму лучи определенного цвета, полученные после разложения в призме белого света, Ньютон обнаружил, что они уже не разлагаются в спектр. Объясните этот опыт.

4. Что такое дисперсия цвета?
5. Какому цвету соответствует наибольшая длина волны, а какому — наименьшая?
6. Какому цвету соответствует большая длина волны — оранжевому или зеленому?
7. Какие лучи сильнее отклоняются призмой — желтые или синие?
- 8*. Как глаз различает цвета?
- 9*. Как формируется цветное изображение на экране телевизора и дисплее компьютера?
- 10*. Какими цветами создается желтый цвет на экране телевизора?
- 11*. Чем обусловлена окраска предметов?
- 12*. Почему листья зеленые?
- 13*. Как возникает радуга? Почему ее можно наблюдать после дождя? Случалось ли вам наблюдать радугу у фонтана?
- 14*. Как надо стоять, чтобы видеть радугу — лицом к Солнцу или спиной к нему?
- 15*. Чем объясняются радужные цвета тонких пленок?
- 16*. Почему небо голубое, а Солнце кажется желтоватым? Почему на закате Солнце «краснеет»?
- 17*. Что такое инфракрасное излучение? Какие тела его излучают? Как оно используется?
- 18*. Что такое ультрафиолетовое излучение? В чем польза и вред ультрафиолетового излучения?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- Согласно *корпускулярной теории* свет представляет собой поток частиц, а согласно *волновой теории* свет имеет волновую природу. Согласно современным представлениям *свет обладает как свойствами волн, так и свойствами частиц*.
- Законы геометрической оптики справедливы, когда размеры препятствий намного больше длины световой волны.
- *Закон прямолинейного распространения света*: в вакууме и в однородной среде свет распространяется прямолинейно.
- *Законы отражения света*: 1) отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения луча; 2) угол отражения равен углу падения.

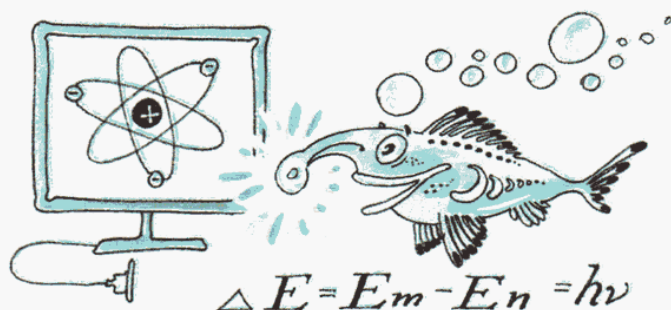
- **Законы преломления света:** 1) преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения луча; 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных сред постоянно: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$. Величину n называют **относительным показателем преломления** двух данных сред.
- Если после преломления в линзе параллельный пучок лучей становится сходящимся, линзу называют **собирающей**. Собирающими являются выпуклые стеклянные линзы.
- Если после преломления в линзе параллельный пучок лучей становится расходящимся, линзу называют **рассеивающей**. Рассеивающими являются вогнутые стеклянные линзы.
- В **фокусе собирающей линзы** сходятся после преломления лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. В **фокусе рассеивающей линзы** сходятся продолжения преломленных лучей, если падающий пучок параллелен главной оптической оси. **Фокусным расстоянием** линзы называют расстояние от плоскости линзы до ее фокуса.
- **Действительным изображением** точки называют точку, в которой пересекаются лучи, идущие из этой точки после преломления в линзе. **Мнимым изображением** точки называют точку, в которой пересекаются продолжения лучей, идущих из этой точки после их преломления в линзе.
- Роль собирающей линзы в глазу выполняют **роговица** и **хрусталик**.
- Назначение **лупы**, **микроскопа** и **телескопа** состоит в том, чтобы **увеличивать угол зрения**, под которым глаз видит изображение предмета.
- **Интерференцией волн** называют наложение волн, при котором в одних областях пространства происходит постоянное взаимное усиление волн, а в других — взаимное гашение волн.
- **Дифракцией света** называют отклонение света от прямолинейного распространения и огибание им препятствий.

- Законы геометрической оптики являются следствиями волновой теории света. Эти законы справедливы, когда длина световой волны намного меньше размера препятствий.
- **Фронт волны** — это совокупность точек пространства, до которых в данный момент дошла волна.
- **Принцип Гюйгенса:** каждая точка фронта световой волны сама становится источником вторичных сферических волн.
- **Физический смысл показателя преломления:** показатель преломления равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в данной среде: $n = \frac{c}{v}$.
- Среди волн видимого света **фиолетовому** цвету соответствуют волны с наименьшей длиной волны (в вакууме $\lambda_{\text{ф}} = 3,8 \cdot 10^{-7}$ м), а **красному** — с наибольшей длиной волны (в вакууме $\lambda_{\text{к}} = 7,6 \cdot 10^{-7}$ м).
- **Дисперсией света** называют зависимость показателя преломления света от длины волны.
- **Инфракрасным излучением** называют электромагнитное излучение с длинами волн от 0,8 мкм до 1—2 мм. Инфракрасные волны излучаются нагретыми телами.
- **Ультрафиолетовым излучением** называют электромагнитное излучение с длинами волн от 10 до 400 нм.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 5

КВАНТЫ И АТОМЫ



Изложенные в предыдущих главах нашего курса разделы физики — механика, молекулярно-кинетическая теория, термодинамика, электродинамика и оптика — объединяются общим названием «классическая физика». Построение классической физики было завершено к концу 19-го века.

Достижения классической физики были очень велики, но в ее рамках не удавалось объяснить закономерности взаимодействия света с веществом, а также понять строение вещества.

Теория, которая смогла это сделать, зародилась в начале 20-го века и продолжает развиваться. Называется она «квантовая физика».

§ 18.

КВАНТЫ СВЕТА — ФОТОНЫ

1. Равновесное тепловое излучение
2. «Ультрафиолетовая катастрофа»
3. Гипотеза Планка

К концу 19-го века казалось твердо установленным, что свет имеет волновую природу, так как представляет собой электромагнитные волны. Однако такое представление о свете не могло дать объяснение тепловому равновесию между веществом и излучением.

Чтобы объяснить это равновесие, немецкий ученый Макс Планк предположил, что свет излучается и поглощается отдельными порциями (квантами).

1. РАВНОВЕСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Как хорошо известно, сильно нагретые тела *светятся*, то есть *излучают* свет — электромагнитные волны. Опыты показывают, однако, что тела излучают электромагнитные волны не только при высокой, а при *любой* температуре, отличной от абсолютного нуля. Это излучение называется *тепловым*.

Тепловое излучение не всегда представляет собой видимый свет: например, при комнатной температуре тело излучает инфракрасные волны.

РАВНОВЕСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

При излучении внутренняя энергия тела *уменьшается*. Но это не обязательно приводит к остыванию тела, так как наряду с излучением тело обычно и *поглощает* электромагнитные волны (рис. 18.1). При поглощении электромагнитных волн внутренняя энергия тела *увеличивается*.



Рис. 18.1. Излучение и поглощение электромагнитных волн, в результате которого между телом и излучением устанавливается тепловое равновесие

В результате излучения и поглощения электромагнитных волн устанавливается *тепловое равновесие* между телом и электромагнитным полем.

Электромагнитное излучение, находящееся в тепловом равновесии с телом, называется *равновесным*. Как вы уже знаете из

курса физики 10-го класса, условием теплового равновесия является *равенство температур* тела и излучения. Таким образом, равновесное излучение должно иметь *такую же температуру*, что и тело, находящееся с ним в тепловом равновесии.

2. «УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА»

Многочисленные наблюдения и опыты свидетельствуют, что вещество и электромагнитное поле могут находиться в тепловом равновесии при *любой* температуре: многие тела имеют постоянную температуру, все время обмениваясь энергией с окружающим их электромагнитным полем. Однако именно этот «простой» факт теплового равновесия между веществом и полем классическая физика объяснить не могла!

Расчеты, выполненные в рамках классической физики, с неизбежностью приводили к странному выводу: тепловое равновесие между веществом и излучением возможно только при *абсолютно нуле температуры*.

Ответственными за такое предельное охлаждение являлись бы электромагнитные волны с очень малой длиной волны, то есть находящиеся за *фиолетовой* границей видимого спектра. Поэтому описанное катастрофическое несоответствие предсказаний классической физики с опытом ученые называли «*ультрафиолетовой катастрофой*».

3. ГИПОТЕЗА ПЛАНКА

Причиной «ультрафиолетовой катастрофы» является положение классической физики о том, что излучение *непрерывно* и поэтому его поглощение и излучение веществом может происходить порциями со сколь угодно малой энергией.

Значит, чтобы избежать «ультрафиолетовой катастрофы», необходимо допустить, что излучению, как и веществу, свойственна *дискретность*, то есть что электромагнитное поле поглощается и излучается веществом отдельными *порциями*, причем энергия этих порций не может быть сколь угодно малой.

Именно такое предположение и сделал в 1900 году немецкий физик Макс Планк. Высказанная им гипотеза гласит:

свет излучается и поглощается веществом не непрерывно, а дискретно, то есть отдельными порциями — квантами¹ (рис. 18.2), причем энергия кванта E и частота излучения ν связаны соотношением $E = h\nu$.

Коэффициент пропорциональности h называли *постоянной Планка*. Измерения показали, что $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с.

¹ От латинского *quantum* — количество.



Макс Планк
(1858—1947)

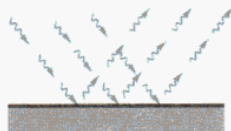


Рис. 18.2. Свет излучается
и поглощается квантами

Выводы, следующие из гипотезы Планка, прекрасно согласовались с опытом. Но эта гипотеза не имела серьезного теоретического обоснования, и поэтому многие ученые (в их числе и сам Планк) рассматривали ее только как рабочую гипотезу, удобную для того, чтобы систематизировать опытные данные.

Однако развитие науки показало, что гипотеза Планка оказалась не рабочей гипотезой, а предвестником революции в физике. Как вы скоро увидите, она привела к рождению новой теории света и вещества — квантовой механике.

Физический смысл гипотезы Планка раскрыл Альберт Эйнштейн, предположив, что свет обладает *корпускулярными* свойствами — то есть свойствами частиц. Частицы света впоследствии назвали *фотонами*.

Предположение Эйнштейна позволило объяснить уже знакомое вам явление фотоэффекта, о чем мы подробнее расскажем в следующем параграфе.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое тепловое излучение?
2. Что такое равновесное излучение?
3. Каково условие теплового равновесия между телом и излучением?
4. При какой температуре согласно классической физике возможно тепловое равновесие между веществом и излучением?
5. Что называют «ультрафиолетовой катастрофой»?
6. В чем состояла гипотеза Планка?
7. Как связаны энергия кванта и частота излучения?
8. Как изменяется энергия фотона при увеличении длины волны света?

§ 19.

ФОТОЭФФЕКТ

1. Законы фотоэффекта
2. Теория фотоэффекта
3. Применение фотоэффекта

Немецкий физик Генрих Герц обнаружил, что свет может вырывать электроны из металла.

Объяснение этому явлению дал Альберт Эйнштейн, предположив, что свет обладает свойствами частиц.

1. ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА

В конце 19-го века немецкий ученый Генрих Герц обнаружил на опыте, что свет может вырывать электроны из металла.

Вырывание электронов из вещества под действием света называют фотоэффектом.

Как мы скоро увидим, объяснить фотоэффект удалось только в предположении, что свет обладает свойствами *частиц*.

Поставим опыт

На рис. 19.1 изображен опыт, с помощью которого демонстрируют явление фотоэффекта.

На цинковую пластину, соединенную с электроскопом, направляют свет ртутно-кварцевой лампы. Под действием излучения лампы пластина приобретает положительный заряд, то есть в ней образуется недостаток электронов.

Это означает, что под действием света из пластины вылетают электроны.

Рис. 19.1. Опыт по демонстрации фотоэффекта

Под действием света цинковая пластина заряжается положительно (знак заряда можно определить, поднося к электроскопу заряженные тела с зарядом известного знака). Это означает, что из пластины вылетают электроны.



Экспериментальное исследование фотоэффекта

На рис. 19.2 схематически изображена установка для исследования фотоэффекта.

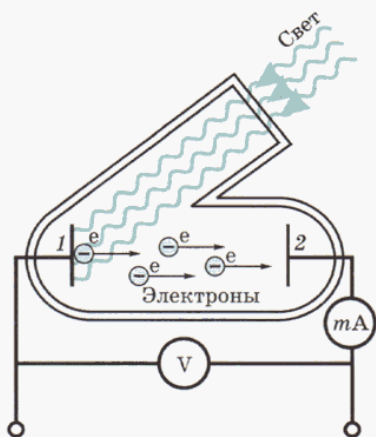


Рис. 19.2. Схема установки для исследования фотоэффекта

В баллон, из которого откачан воздух, помещены электроды 1 и 2. Поток света падает на электрод 1 и вырывает из него электроны. Часть этих электронов попадает на электрод 2, в результате между электродами 1 и 2 возникает ток. Этот ток называют фототоком. Силу фототока измеряют миллиамперметром. Напряжение между электродами можно изменять (оно измеряется вольтметром).

С помощью такой установки можно измерять *число* *ежесекундно* *вырывааемых светом электронов*, а также *максимальную кинетическую энергию вырванных электронов*.

Число вырванных электронов можно определить по силе фототока, измеряемой миллиамперметром.

Максимальную же кинетическую энергию вырванных электронов можно найти, измерив напряжение между электродами, при котором фототок *прекращается*.

На электроды подают такое напряжение, чтобы потенциал электрода 2 был ниже, чем потенциал электрода 1. Тогда вырванные светом электроны будут *отталкиваться* от электрода 2 (так как электроны заряжены отрицательно). При увеличении напряжения число электронов, достигших электрода 2, преодолев отталкивание, будет уменьшаться.

Таким образом, при увеличении напряжения сила фототока уменьшается. И при некотором значении напряжения, которое называют *задерживающим напряжением*, фототок прекратится совсем: *ни один* из вырванных светом электронов не сможет достичь электрода 2, так как начальной кинетической энергии электронов будет недостаточно для того, чтобы преодолеть действие электрического поля.

Нас будет интересовать далее в основном *энергия* вырывааемых электронов, потому что именно она оказалась совсем не такой, какая предсказывалась классической электродинамикой.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА

В начале 20-го века несколько ученых, в том числе российский физик Александр Григорьевич Столетов, установили на опыте следующие законы фотоэффекта.

1. *Количество электронов*, вырываемых светом каждую секунду с поверхности металла, пропорционально поглощенной энергии света.

2. *Максимальная кинетическая энергия* вырванных электронов E_k линейно возрастает при увеличении частоты падающего света (рис. 19.3).

3. Когда частота падающего света меньше некоторого определенного значения $\nu_{\min}$ (называемого *красной границей фотоэффекта*), фотоэффект не происходит (см. рис. 19.3).



Александр Григорьевич
Столетов
(1839—1896)

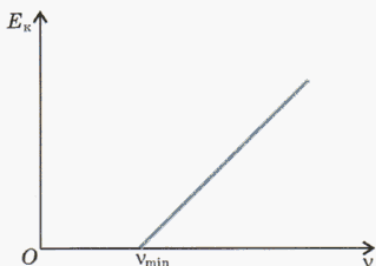


Рис. 19.3. Зависимость максимальной кинетической энергии вырванных электронов E_k от частоты света ν

Название «красная граница фотоэффекта» обусловлено тем, что это граничное значение частоты света, вызывающего фотоэффект, со стороны *малых* частот, то есть больших длин волн. А большие длины волн соответствуют красной части спектра.

Однако на самом деле красная граница фотоэффекта далеко не всегда соответствует именно красному цвету. Например, для цинка она лежит в ультрафиолетовой области — поэтому в описанном выше опыте и понадобилась ртутно-кварцевая лампа: она испускает ультрафиолетовое излучение.

Для калия красная граница фотоэффекта соответствует желтому цвету, а для цезия — оранжевому.

Почему законы фотоэффекта противоречат классической физике?

Первый закон фотоэффекта можно объяснить с помощью классической физики, но *второй* и *третий* законы не находят в ней объяснения.

Дело в том, что согласно классической электродинамике энергия световой волны зависит только от ее амплитуды и не зависит от частоты. Поэтому невозможно объяснить установленный на опыте второй закон фотоэффекта, согласно которому максимальная кинетическая энергия вырванных электронов *линейно возрастает* при увеличении частоты падающего света. По той же причине не находит объяснения и третий закон фотоэффекта.

Отметим еще одну особенность фотоэффекта, также необъяснимую в рамках классической электродинамики. Опыт показывает, что фототок возникает *сразу же* при попадании света на электрод 1. Согласно же классической электродинамике для того, чтобы световая волна «раскачала» электрон, сообщив ему энергию, достаточную, чтобы он смог вырваться из металла, должно обязательно пройти некоторое время.

2. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Теорию фотоэффекта создал в 1905 году Альберт Эйнштейн, разлив гипотезу Планка об излучении и поглощении света отдельными порциями. Эйнштейн решил возродить побежденную корпускулярную теорию света и предположил, что свет представляет собой поток *частиц* — впоследствии их назвали *фотонами*. Свободный электрон в металле может поглотить фотон только *целиком*, получив при этом энергию фотона $E = h\nu$.

Чтобы вырваться из металла, электрону необходимо совершить некоторую работу, называемую *работой выхода* $A_{\text{вых}}$, так как положительно заряженная ионная решетка притягивает электрон. Следовательно, полученная электроном при поглощении фотона энергия $h\nu$ расходуется на совершение работы выхода и на сообщение вылетевшему электрону кинетической энергии E_k .

Из закона сохранения энергии следует, что $h\nu = A_{\text{вых}} + E_k$, то есть выполняется соотношение

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}, \text{ где } m \text{ и } v \text{ — масса и скорость электрона.}$$

Это и есть *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта*.

Предложенная Эйнштейном теория фотоэффекта убедительно объяснила как второй, так и третий законы фотоэффекта.

Действительно, согласно уравнению Эйнштейна максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов линейно зависит от частоты света: $E_k = h\nu - A_{\text{вых}}$, что соответствует опыту (см. рис. 19.3).

Далее, если энергия падающих фотонов меньше работы выхода, то есть $h\nu < A_{\text{вых}}$, то фотоны не смогут вырывать электроны из

металла, то есть фотоэффект происходить не будет. Это объясняет существование красной границы фотоэффекта: она находится из условия $\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Фотоэффект превращает свет в электрический ток, благодаря чему изображение можно преобразовывать в электрические сигналы и передавать на расстояние. Это используется в *телевидении*.

Фотоэффект используют также при создании *фотоэлементов* — приборов, с помощью которых можно управлять включением и выключением механизмов, уличного освещения и др. Например, фотоэлементы стоят в турникетах метро и предотвращают несчастные случаи на производстве (когда рука рабочего оказывается в опасной зоне, она перекрывает луч света, попадающий на фотоэлемент, вследствие чего останавливается станок или другой механизм).

Фотоэлементы используют при считывании *информации* (изображения, звука или данных) с оптических дисков (*компакт-дисков*), которые являются сегодня одной из наиболее распространенных форм записи и хранения информации (рис. 19.4).

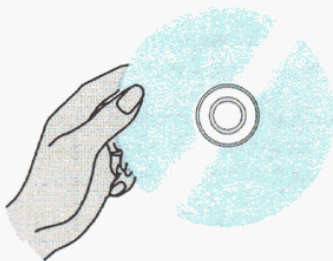


Рис. 19.4. На одном оптическом диске помещается библиотека

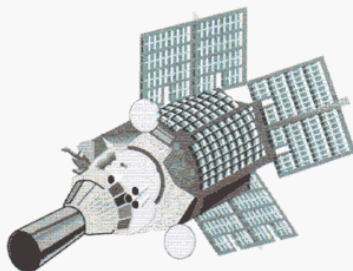


Рис. 19.5. Солнечные батареи на космическом корабле

На оптическом диске информация записана на спиральной дорожке в виде крошечных углублений. При вращении диска в компьютере или лазерном проигрывателе по дорожке скользит лазерный луч¹, и изменения интенсивности отраженного луча распознаются фотоэлементом, который превращает их в электрические сигналы. Применение оптических дисков совершило рево-

¹ О лазерах мы расскажем в § 22. *Лазеры*.

люцию в мире информации: на одном диске помещается целая библиотека.

Поскольку с помощью фотоэлементов световая энергия преобразуется в электрическую, их применяют в солнечных батареях для получения электроэнергии. Такие батареи используют в жарком климате, а также на космических кораблях (рис. 19.5).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое фотоэффект? Кто открыл это явление? Какой российский физик исследовал фотоэффект?
2. Сформулируйте законы фотоэффекта.
3. Что такое красная граница фотоэффекта?
4. Какие законы фотоэффекта противоречат классической электродинамике? В чем состоит это противоречие?
5. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Отражением какого закона сохранения является это уравнение?
6. Как теория фотоэффекта, предложенная Эйнштейном, объясняет законы фотоэффекта?
- 7*. Может ли кинетическая энергия электрона, вылетевшего с поверхности металла под действием фотона, быть равной энергии этого фотона? Обоснуйте ваш ответ.
- 8*. Частоту падающего света уменьшили в 2 раза. Можно ли утверждать, что максимальная кинетическая энергия вырванных этим светом электронов уменьшилась тоже в 2 раза? Обоснуйте ваш ответ.
- 9*. На поверхности различных металлов падает излучение одинаковой частоты. При этом для первого металла наблюдается фотоэффект, а для второго — нет. У какого металла работа выхода электронов больше?
- 10*. Какие вам известны примеры применения фотоэффекта?

§ 20. СТРОЕНИЕ АТОМА

1. Опыт Резерфорда
2. Планетарная модель атома
3. Постулаты Бора

В начале 20-го века английский физик Эрнест Резерфорд открыл атомное ядро. Оказалось, что в ядре сосредоточена почти вся масса атома.

Первые шаги к построению теории атома сделал датский физик Нильс Бор.

1. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА

В переводе с греческого «атом» означает «неделимый». И действительно, долгое время ученые считали атомы неделимыми «кирпичами мироздания».

Предполагалось, что все вещества (а химикам были известны уже тысячи различных веществ) состоят из нескольких десятков различных типов атомов.

Представление о неделимости атома оказалось под сомнением, когда в конце 19-го века английский физик Дж. Дж. Томсон открыл электрон. Масса электрона оказалась примерно в две тысячи раз меньше массы самого легкого атома, а это означало, что электроны каким-то образом входят в состав атомов, то есть атомы должны быть *составными* объектами.

Первую модель атома предложил сам Томсон: он предположил, что атом подобен кексу с изюмом, где роль изюминок играют электроны (рис. 20.1).

Рис. 20.1. Модель атома Томсона

Внутри положительно заряженного шара диаметром около 10^{-10} м находятся отрицательно заряженные электроны — подобно изюминкам в кексе.



ИДЕЯ ОПЫТА РЕЗЕРФОРДА

Английский физик Эрнест Резерфорд понял, что справедливость модели атома Томсона удастся проверить на опыте, если найти, чем можно было бы «процупать» атом.

В качестве такого «щупа» Резерфорд решил использовать положительно заряженные α -частицы¹, которые вылетали при радиоактивных распадах некоторых атомных ядер². Заряд этих частиц по модулю в 2 раза больше заряда электрона, а масса примерно в 8000 раз больше массы электрона. Скорость α -частиц составляла около 20 000 км/с.

Если модель Томсона справедлива, быстрые и массивные α -частицы, пролетая сквозь атомы с очень легкими электронами, практически не должны изменять направления движения — подобно тому как свинцовые пули не изменяли бы своего направления полета, пролетая сквозь настоящий кекс с настоящими изюминками.

СХЕМА ОПЫТА РЕЗЕРФОРДА

На рис. 20.2 изображена схема опыта, поставленного Резерфордом в 1911 году.

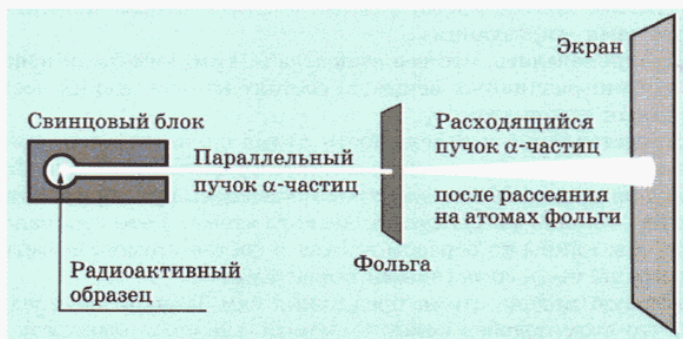


Рис. 20.2. Схема опыта Резерфорда

На пути α -частиц, вылетающих из канала, просверленного в свинцовом блоке, помещают тонкую фольгу, а за ней — экран, покрытый специальным веществом: при попадании α -частицы на экран там появлялась светящаяся точка. Наблюдая экран в микроскоп, можно было определять, как отклоняются α -частицы, пролетая сквозь атомы металла.

ОТКРЫТИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Первые результаты, полученные Резерфордом, казалось бы, подтверждали справедливость модели атома Томсона: α -частицы

¹ В дальнейшем выяснилось, что α -частицы — это ядра атомов гелия.

² Более подробно о распадах ядер рассказано в § 25. *Радиоактивность*.

пролетали сквозь фольгу, почти не отклоняясь от своего первоначального направления.

Но, будучи настоящим исследователем, Резерфорд решил проверить на опыте даже то, что казалось невероятным. И он предложил своим молодым сотрудникам на всякий случай выяснить: могут ли α -частицы рассеиваться на *большие* углы?

Передадим слово самому Резерфорду¹:

«По секрету могу сказать, что сам я не верил, что это возможно. Но через несколько дней ко мне пришел взволнованный Гейгер и сказал: “Нам удалось наблюдать α -частицы, отлетевшие от фольги назад...” Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовым снарядом выстрелили в лист бумаги и снаряд, отскочив назад, попал бы в стрелявшего. Именно тогда у меня и возникла идея об очень малом ядре атома, где сосредоточена практически вся масса атома и весь положительный заряд».

Действительно, чтобы быстрая и массивная α -частица в результате столкновения полетела *назад*, она должна была столкнуться с чем-то еще *более массивным* и *очень малым* по своим размерам (рис. 20.3).



Эрнест Резерфорд
(1871—1937)



Рис. 20.3. Отклонение
 α -частиц при столкновении
с атомным ядром

Так было открыто *атомное ядро*. Это открытие оказало такое влияние на историю 20-го века, что его назвали «веком атома».

¹ Цитаты приводятся в сокращении. Сотрудник Резерфорда Гейгер стал впоследствии изобретателем знаменитого счетчика Гейгера, который используют и сегодня для измерения уровня радиоактивности.

2. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Чтобы оценить размер атомного ядра, Резерфорд вычислил, на какое расстояние к положительно заряженному ядру должна приблизиться положительно заряженная α -частица, чтобы, оттолкнувшись согласно закону Кулона, изменить направление движения на противоположное. Полученный результат поразил физиков: оказалось, что *атомное ядро в десятки тысяч раз меньше атома*: размер ядра — около 10^{-14} — 10^{-15} м, а размер атома — примерно 10^{-10} м.

Чтобы вы тоже смогли разделить удивление физиков того времени, приведем сравнение: ядро в центре атома подобно булавочной головке посреди футбольного поля! И в этой «булавочной головке» сосредоточена почти вся масса атома.

Это очень напоминает Солнечную систему: ведь и размеры Солнца очень малы по сравнению с размерами планетных орбит, а масса его примерно в тысячу раз больше суммарной массы всех планет, вместе взятых. Сходство атома с Солнечной системой усиливалось и сходством между законом Кулона и законом всемирного тяготения: в обоих случаях сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Исходя из этого, Резерфорд предложил *планетарную модель атома* (рис. 20.4).

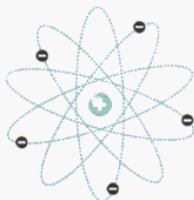


Рис. 20.4. Планетарная модель атома

Вокруг малого и массивного положительно заряженного ядра движутся по орбитам легкие электроны — подобно тому, как вокруг Солнца движутся планеты.

Поскольку атом в целом электрически нейтрален, положительный заряд ядра равен по модулю суммарному заряду всех движущихся вокруг ядра электронов.

НЕДОСТАТКИ ПЛАНЕТАРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА

Несмотря на свою привлекательность, планетарная модель атома не могла дать ответы на очень важные вопросы.

Стабильность атомов

Прежде всего, в рамках классической физики (а другой тогда еще не существовало!) планетарная модель атома не могла объяснить стабильность атомов.

Опыты свидетельствуют, что атомы чрезвычайно стабильны: так, подавляющее большинство атомов, из которых состоят окружающие нас предметы (да и мы сами), существуют *миллиарды лет*.

Согласно же планетарной модели жизнь атома должна измеряться миллиардными долями секунды!

Дело в том, что в этой модели электроны движутся вокруг атомного ядра с колоссальным ускорением, обусловленным силой притяжения к ядру, — это ускорение в миллионы миллионов раз больше ускорения свободного падения. А согласно классической электродинамике ускоренно движущийся заряд должен излучать электромагнитные волны. И, по расчетам, двигаясь с таким огромным ускорением, электрон должен потерять всю свою энергию вследствие излучения и «упасть» на ядро всего через несколько *миллиардных долей секунды*.

Как мы видим, расхождение теории с опытом оказывается здесь столь же катастрофическим, как и в случае «ультрафиолетовой катастрофы».

Сходство атомов одного и того же химического элемента

Планетарная модель атома не могла также объяснить поразительное сходство различных атомов одного и того же химического элемента: опыт показывает, что эти атомы похожи друг на друга значительно больше, чем братья-близнецы.

Согласно же планетарной модели атома каждый атом должен был бы быть *единственным в своем роде*: ведь согласно классической механике каждый электрон может двигаться по *любой* из бесконечного множества орбит — подобно планетам, движущимся вокруг Солнца. Значит, должно было бы наблюдаться бесконечное разнообразие атомов одного и того же химического элемента. Но ничего подобного в природе не наблюдается. Все атомы водорода *одинаковы*, так же как одинаковы все атомы кислорода или атомы золота¹.

3. ПОСТУЛАТЫ БОРА

Как мы видели, в рамках классической физики планетарная модель атома противоречит опыту. Это указывало на то, что законы классической физики неприменимы в масштабах атома.

Первую попытку «угадать» новые законы атомной физики предпринял молодой датский физик Нильс Бор в 1913 году.

¹ Строго говоря, атомы одного и того же химического элемента могут несколько отличаться друг от друга вследствие существования изотопов (подробнее мы расскажем об этом в § 24. *Атомное ядро*).

В стремлении «спасти» планетарную модель атома он дополнил ее положениями, которые получили впоследствии название *постулатов Бора*.

Вот эти постулаты:

1. Электроны в атомах движутся только по определенным орбитам, называемым *стационарными* (рис. 20.5). Каждой орбите соответствует определенная энергия электрона E_n , где n — номер орбиты.

2. Электроны излучают фотоны только *при переходе* с одной орбиты на другую, с меньшей энергией. Энергия излученного фотона равна разности энергий электрона на орбитах: $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ (рис. 20.6). Отсюда следует, что атом может излучать свет только с частотами $\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}$.

Атом может также поглощать фотоны. При поглощении фотона электрон в атоме переходит со стационарной орбиты с меньшей энергией на орбиту с большей энергией. Следовательно, каждый атом может поглощать свет только с частотами $\nu_{kn} = \frac{|E_k - E_n|}{h}$ (рис. 20.7).

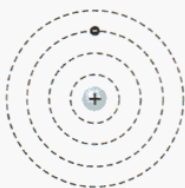


Рис. 20.5. Стационарные орбиты в атоме Бора

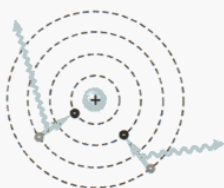


Рис. 20.6. Излучение фотона при переходе электрона с одной орбиты на другую

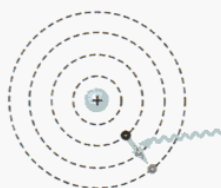


Рис. 20.7. Поглощение фотона при переходе электрона с одной орбиты на другую

Состояние атома, в котором все электроны находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, называют *основным*. Все другие состояния атома называют *возбужденными*.

СЛЕДСТВИЯ ПОСТУЛАТОВ БОРА

Постулаты Бора позволили объяснить стабильность атомов, а также сходство атомов одного и того же химического элемента.

Стабильность атомов, согласно Бору, объясняется тем, что для каждого электрона в атоме существует орбита с *наименьшей* возможной энергией. И когда все электроны в атоме находятся на орбитах с наименьшей возможной энергией, атом не может излу-

чать энергию. Поэтому в основном состоянии атом может находиться сколь угодно долго.

Сходство атомов одного и того же химического элемента объясняется тем, что стационарные орбиты электронов во всех атомах данного элемента *одни и те же*.

ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА

Количественного согласия с экспериментом Бору удалось достичь только при описании простейшего атома — атома водорода. Однако уже для атома гелия добиться согласия с опытом не удавалось, не говоря уже о более сложных атомах.

Тем не менее теория Бора сыграла огромную роль в понимании явлений микромира, «приоткрыв завесу» над загадкой атома.

Понадобилось больше десяти лет усилий ученых нескольких стран, чтобы построить последовательную теорию явлений микромира — квантовую механику. Об основных ее положениях мы расскажем в § 23. *Квантовая механика*.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что представляла собой модель атома, предложенная Томсоном?
2. Почему результаты опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц противоречили модели атома Томсона?
3. Какова модель атома, предложенная Резерфордом? Почему ее называли планетарной моделью?
4. Почему планетарная модель атома не могла объяснить стабильность атомов?
5. Почему планетарная модель атома не могла объяснить сходство атомов?
6. Сформулируйте постулаты Бора.
7. Какое состояние атома называют основным состоянием?
8. Как теория Бора объясняет стабильность атомов?
9. Как теория Бора объясняет сходство атомов?

§ 21. АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ

1. Спектры излучения и поглощения
2. Энергетические уровни

Спектры излучения и поглощения атомов подобны отпечаткам пальцев: каждый химический элемент характеризуется своим спектром.

Изучение спектров позволило получить важные сведения о строении атомов различных элементов.

Благодаря спектральному анализу удастся с высокой точностью определять химический состав тел, в том числе недоступных (например, звезд).

1. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как вы уже знаете, с помощью призмы можно разложить белый свет в спектр со всеми цветами радуги (см. § 17. *Цвет*). Используя специальные приборы (спектроскоп и спектрограф, основным элементом которых является призма), можно исследовать спектры излучения различных тел.

Опыты показали, что свет с *непрерывным* спектром, подобным спектру Солнца, излучают *сильно нагретые твердые тела и жидкости*.

Спектр же сильно нагретого атомарного газа является *линейчатым*, то есть представляет собой совокупность ярких цветных линий на темном фоне.

Например, на рис. 21.1, *а* (см. также рисунок на форзаце) приведен спектр излучения атомарного водорода.

А если внести в пламя газовой горелки кусочек поваренной соли, мы увидим в спектре излучения две очень близко расположенные яркие желтые линии (рис 21.1, *б* и рисунок на форзаце). Эти линии представляют собой часть спектра излучения паров натрия, образующихся при расщеплении поваренной соли.

В атомарных газах атомы изолированы друг от друга и излучают свет «поодиночке», поэтому линейчатая структура спектров атомарных газов свидетельствует о том, что

изолированные атомы испускают свет только с определенными длинами волн.



Рис. 21.1. Линейчатый спектр излучения: *а* — водорода; *б* — паров натрия

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

Мы не случайно упомянули выше о ярких линиях излучения паров натрия. Как вы сейчас увидите, они сыграли особую роль в разгадке одной из загадок природы.

В начале 19-го века английский ученый Уильям Волластон обнаружил в непрерывном солнечном спектре тонкие *темные* линии (рис. 21.2, а также рисунок на форзаце).



Рис. 21.2. Темные линии в солнечном спектре

Происхождение этих темных линий оставалось загадкой в течение нескольких десятилетий: было непонятно, что может *задерживать* излучение именно с *определенными* длинами волн?

В середине 19-го века немецкий ученый Густав Кирхгоф заметил, что положение двух близко расположенных *темных* линий в солнечном спектре точно совпадает с положением *ярких* желтых линий в спектре паров натрия. И Кирхгоф предположил, что близкие темные линии — результат *поглощения* солнечного света парами натрия, находящимися во внешней атмосфере Солнца.

Чтобы проверить это, ученый исследовал спектр солнечного света, прошедшего сквозь холодные пары натрия. И в непрерывном спектре действительно появились *темные* линии, положение которых точно совпало с линиями излучения паров натрия!

Тогда Кирхгоф предположил, что сходная картина должна наблюдаться и для других веществ. И поставленные им опыты подтвердили, что

линии поглощения атомов всех элементов точно соответствуют их линиям испускания.

Сравните, например, спектры излучения и поглощения водорода, приведенные на рис. 21.3 (см. также на форзаце).



Рис. 21.3. Спектр излучения (а) и спектр поглощения (б) водорода. Сравните положение линий излучения и линий поглощения

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Спектр излучения (или поглощения) атома подобен «отпечаткам пальцев»: каждый химический элемент характеризуется своим *уникальным* спектром. Поэтому, исследуя спектры, можно с высокой точностью определять химический состав тел.

С помощью спектрального анализа удалось открыть также *новые химические элементы*. Некоторые из них были даже названы в соответствии с цветами ярких линий их спектра — так, рубидий характеризуется яркой рубиновой линией в спектре.

С помощью спектрального анализа определяют химический состав недостижимых тел — например, Солнца и звезд. Так, при изучении спектра солнечной атмосферы был открыт *гелий* (получивший название от греческого слова «гелиос» — солнце).

Лучи света от далеких галактик поведали нам «на языке атомных спектров» о расширении Вселенной. Более подробно мы расскажем об этом в § 35. *Происхождение и эволюция Вселенной*.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ

ОБЪЯСНЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ В ТЕОРИИ БОРА

Согласно постулатам Бора излучение и поглощение света атомом происходит при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую. При этом частота излученного или поглощенного света может принимать только определенный ряд значений:

$\nu_{kn} = \frac{|E_k - E_n|}{h}$, где E_k и E_n — уровни энергии, соответствующие стационарным состояниям.

Это объясняет линейчатый характер спектров излучения и поглощения атомов, а также то, что атомы каждого элемента излучают и поглощают свет с *одними и теми же частотами*.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ

Значения энергии электрона в атоме называют *энергетическими уровнями*.

При этом энергию электрона задают обычно в *электрон-вольтах* (эВ). Вы уже знакомы с этой единицей энергии. Напомним, что $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Схематическое изображение энергетических уровней

При изображении энергетических уровней на схеме шкалу энергии располагают вертикально, а сами уровни обозначают справа от этой шкалы горизонтальными отрезками. На рис. 21.4 схематически изображены три энергетических уровня.

Если считать энергию *свободного* (удаленного от ядра на большое расстояние) покоящегося электрона равной нулю, то энергетические уровни *связанных* электронов (движущихся около ядра) должны соответствовать *отрицательным* значениям энергии. Объясним почему.

Чтобы оторвать электрон от ядра, надо совершить *положительную* работу, потому что электрон *притягивается* к ядру. Следовательно, для удаления электрона от ядра надо *увеличить* его энергию. После этого увеличения энергии электрон станет *свободным*, и если он будет покоиться, его энергия будет равна *нулю*. Значит, энергия электрона до отрывания, то есть энергия *связанного* электрона, меньше нуля.

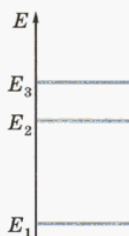


Рис. 21.4. Схематическое изображение трех энергетических уровней

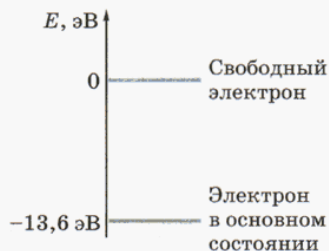


Рис. 21.5. Уровень энергии свободного электрона с равной нулю скоростью и уровень, соответствующий основному состоянию атома водорода

На рис. 21.5 в качестве примера изображен нулевой уровень энергии, соответствующий свободному электрону, а также уровень, соответствующий минимально возможной энергии электрона в атоме водорода ($-13,6 \text{ эВ}$).

Чтобы оторвать электрон от ядра атома водорода, находящегося в основном состоянии, то есть превратить этот атом в положительно заряженный ион, необходимо сообщить электрону энергию, равную 13,6 эВ. Поэтому ее называют *энергией ионизации* атома водорода.

ПРИНЦИП ПАУЛИ И ТАБЛИЦА МЕНДЕЛЕЕВА

Когда ученые с помощью изучения спектров излучения и поглощения атомов нашли энергетические уровни электронов в атомах, выяснилось, что даже когда атом находится в основном состоянии, далеко не все его электроны находятся на самом нижнем из возможных уровней. На самом деле электроны «заселяют» последовательно так называемые электронные оболочки, соответствующие все большей и большей энергии. Именно эти оболочки и определяют химические свойства атомов.

И возник вопрос: почему же *все* электроны атома, излучив фотоны, не «падают» на *один и тот же* самый нижний уровень?

Ответ нашел швейцарский физик Вольфганг Паули. Он открыл, что электроны подчиняются своеобразному принципу запрета. Согласно *принципу Паули* на каждом уровне в атоме может находиться не более *двух* электронов. Поэтому с ростом числа электронов в атоме они и заполняют последовательно энергетические уровни снизу вверх — по два электрона на уровне.

Принцип Паули позволил понять природу Периодической системы химических элементов (таблицы Менделеева).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие источники света излучают непрерывные спектры?
2. Что такое линейчатый спектр? Находящиеся в каком состоянии вещества излучают линейчатый спектр?
3. Что такое спектр поглощения?
4. Как связаны спектр излучения и спектр поглощения для одного и того же вида атомов?
5. Что такое спектральный анализ? Какие вам известны примеры применения спектрального анализа?
6. Как теория Бора объясняет существование линейчатых спектров?
7. Как теория Бора объясняет соответствие между спектрами излучения и поглощения?
8. Как схематически изображают энергетические уровни атома?
9. Может ли электрон в атоме при переходе с одного энергетического уровня на другой излучить сразу два фотона?

§ 22. ЛАЗЕРЫ

1. Применение лазеров
2. Спонтанное и вынужденное излучение
3. Принцип действия лазера

Во второй половине 20-го века были созданы принципиально новые источники излучения — лазеры¹. Лазер излучает очень узкий пучок света определенной длины волны.

Область применения лазеров очень широка — от медицины и бытовой техники до космических систем связи. Действие лазера основано на явлении вынужденного излучения света атомами.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ

Многим из вас знаком узкий, как игла, луч лазерного фонарика (указки, брелка), далеко «простреливающий» ночную тьму и густой туман.

Ученые и инженеры сконструировали лазерный «фонарик», луч которого достает до Луны! Именно так и было наиболее точно измерено расстояние от Земли до Луны. Посланный с Земли луч лазера отразился от установленного астронавтами на поверхности Луны отражателя, а отраженный луч был зарегистрирован на Земле. По времени «путешествия» лазерного луча с Земли на Луну и обратно удалось очень точно определить пройденное им расстояние, так как скорость света измерена с большой точностью.

По своей интенсивности и направленности луч лазера не знает равных. С помощью лазерного луча сваривают металлические конструкции, он может быть использован как опаснейшее оружие в звездных войнах².

Но лазерный луч замечателен не только своей мощностью. Он «проявляет чудеса» и в чрезвычайно миниатюрной работе: так, с помощью лазерного луча делают тончайшие хирургические операции — например, «приваривают» отслоившуюся сетчатку к главному дну.

Еще более узкий лазерный луч записывает и считывает информацию с компакт-дисков в лазерных проигрывателях и компьютерах. Мы уже привыкли к лазерным проигрывателям и даже не подозреваем, что, когда мы слушаем музыку или смотрим фильм,

¹ Из первых букв *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (в переводе с английского — усиление света вынужденным излучением).

² Подобное оружие было предсказано еще в начале 20-го века русским писателем А. Н. Толстым в романе «Гиперболоид инженера Гарина».

крошечный луч лазера «старается» всю, считывая с огромной скоростью информацию с узенькой дорожки на компакт-диске.

Использование лазеров совершило революцию в электронных средствах связи. Дело в том, что лазер излучает свет *определенной* частоты, благодаря чему лазер можно использовать как генератор чрезвычайно высокочастотных волн — с частотой, равной частоте видимого света! И эту частоту можно использовать в качестве «несущей частоты» при передаче радио- или телевизионных сигналов (см. § 12. *Передача информации с помощью электромагнитных волн*). «Информационная емкость» такого способа передачи информации многократно превосходит все предыдущие: так, расчеты показывают, что на одном лазерном луче может уместиться до 80 миллионов телевизионных каналов или до 50 миллиардов одно-временных телефонных разговоров!

С помощью лазеров удалось создать *трехмерные* изображения, которые называют *голографическими*. Рассматривая голограмму под разными углами, вы можете видеть изображенный на ней предмет *с разных сторон*: например, на голограмме можно заглядывать за предметы, расположенные на переднем плане.

Принцип действия лазера основан на предсказанном Альбертом Эйнштейном в начале 20-го века явлении вынужденного излучения света. Особую роль при этом играют так называемые метастабильные состояния атома — возбужденные состояния с особенно большим временем жизни.

Об этом мы сейчас и расскажем.

2. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА

Как вы уже знаете, поглотив фотон, атом переходит в возбужденное состояние. Однако пребывает он в таком состоянии очень недолго: обычно уже через несколько *десятиллионных* долей секунды атом самопроизвольно излучает один или несколько фотонов, переходя в основное состояние. Такое излучение называют *спонтанным излучением*. Именно его мы и рассматривали ранее в § 20. *Строение атома* (см. рис. 20.6).

Метастабильные состояния

Различные возбужденные состояния атома отличаются один от другого не только энергией, но и *временем жизни*. Среди этих состояний есть такие, в которых атом пребывает в *десятки тысяч раз дольше*, чем в других. Состояния атома с особенно большим временем жизни называют *метастабильными*.

Именно эти состояния активно используются при работе лазера. Дело в том, что метастабильное состояние может сыграть роль ловушки: оказавшись в этом состоянии, атом надолго «застревает» в нем, так как время жизни этого состояния в десятки тысяч раз превосходит время жизни обычных возбужденных состояний. Благодаря этому в метастабильном состоянии с *одной и той же энергией* может скопиться очень много атомов.

Если *заставить* теперь эти атомы *одновременно* излучить фотоны, излучение будет чрезвычайно интенсивным и к тому же будет иметь определенную частоту.

ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА

Но как заставить атом излучить фотон?

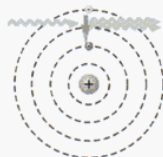
Это можно сделать, используя предсказанное в 1916 году Эйнштейном явление вынужденного излучения света.

Вы уже знаете, что атом может излучать свет только с определенными частотами. Эйнштейн теоретически доказал, что если на атом падает свет, частота которого *совпадает* с частотой света, который этот атом может излучить, вероятность излучения значительно увеличивается.

Излучение атомов под действием падающего света называют вынужденным излучением.

Замечательная особенность вынужденного излучения состоит в том, что излученный атомом фотон имеет *точно такую же частоту и направление движения*, что и падающий на атом фотон. Вынужденное излучение схематически изображено на рис. 22.1.

Рис. 22.1. Вследствие вынужденного излучения падающее на атом излучение «удваивается»: к атому «приходит» один фотон, а «уходят» два точно таких же



Если в данной среде много атомов находятся в возбужденном состоянии с *одной и той же энергией*, излученные фотоны будут в свою очередь вынуждать другие атомы излучать точно такие же фотоны. И в результате интенсивность излучения может *лавиннообразно нарастать*. На этом, как мы сейчас увидим, и основан принцип действия лазеров.

Усиление падающей волны, обусловленное вынужденным излучением, впервые наблюдал на опыте советский физик Валентин Александрович Фабрикант в 1939 году.

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА

КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

«Запустить» лавину вынужденного излучения можно и без внешнего излучения: фотон, спонтанно излученный одним из атомов самой среды, вынудит другой атом излучить *такой же* фотон, затем два этих фотона вынудят еще два атома излучить еще два *таких же* фотона и так далее. При этом может возникнуть лавинообразный процесс (рис. 22.2). На этом основано действие *квантовых генераторов*.

Если излучение происходит в оптическом диапазоне, квантовые генераторы называют *лазерами*.



Рис. 22.2. Генерирование интенсивной электромагнитной волны вследствие вынужденного излучения

Вынужденное излучение для генерирования электромагнитных волн впервые использовали в 1954 году советские физики Николай Геннадиевич Басов и Александр Михайлович Прохоров, а также американский физик Чарльз Таунс, за что эти ученые были удостоены Нобелевской премии.

ТРЕХУРОВНЕВЫЙ ЛАЗЕР

При создании лазера часто используют систему *трех энергетических уровней* атома, среди которых средний уровень является метастабильным, а нижний соответствует основному состоянию атома (рис. 22.3).

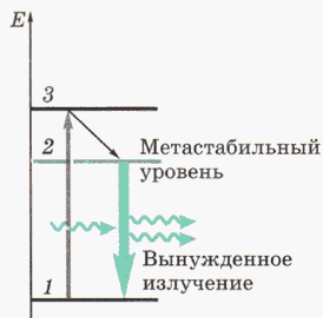


Рис. 22.3. Под действием интенсивного внешнего излучения атомы переходят с основного уровня на уровень 3 (левая вертикальная стрелка)

Время жизни в состоянии 3 очень мало, и поэтому вскоре многие атомы перейдут на метастабильный уровень 2 (этот переход показан наклонной стрелкой). Теперь в среде может начаться лавинообразный процесс генерации излучения при переходах с уровня 2 на основной уровень 1 (волнистые стрелки).

Рубиновый лазер

Для того чтобы вынужденное излучение действительно породило лавину, необходимо, чтобы как можно больше атомов, находящихся в метастабильном состоянии, «почувствовали» падающее

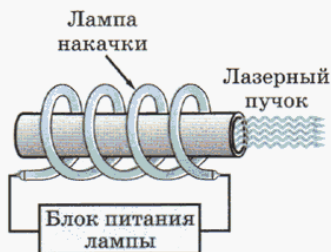
на них излучение. А для этого нужно *продлить время* пребывания излучения внутри вещества.

Рассмотрим, как это делается, на примере рубинового лазера.

Кристалл рубина состоит из атомов алюминия и кислорода с небольшой примесью атомов хрома — именно атомы хрома и придают рубину его благородный цвет. Эти же атомы обладают и рассмотренной выше системой трех энергетических уровней, средний из которых является метастабильным.

Из рубинового кристалла вытачивают стержень (со строго параллельными торцами!) и навивают на него трубку газоразрядной лампы, которую называют *лампой накачки* (рис. 22.4).

Рис. 22.4. Схематическое изображение рубинового лазера



Под действием света лампы накачки атомы хрома переходят с основного уровня 1 на уровень 3 (см. рис. 22.3), а затем — практически сразу — на *метастабильный* уровень 2. Переходы на этот уровень обусловлены в основном передачей энергии кристаллической решетке.

В результате этих переходов на метастабильном уровне 2 скапливается большое число атомов, то есть возникает, как говорят, «перенаселенность» метастабильного уровня 2.

Среду, в которой самым населенным является один из возбужденных уровней атомов, называют *активной*. Такая среда обладает запасом энергии, который делает возможным лавинообразный процесс вынужденного излучения.

Но создать активную среду еще недостаточно: если вынужденно излученные фотоны *сразу же* вылетят из нее, лавина не возникнет. Для ее возникновения надо каким-то образом задержать излученные фотоны в среде. Но как это сделать? Ведь фотоны не останавлишь: они всегда движутся со скоростью света.

Ученые догадались, что «задержать» фотоны все-таки можно — для этого надо продлить их *путь* с помощью *отражения*.

С этой целью параллельные торцы кристалла покрывают тонким слоем серебра, делая их зеркальными. Отражаясь от торцов, фотоны, летящие вдоль оси кристалла, проходят через кристалл *многократно* — туда и обратно. При этом вследствие вынужденного излучения их число лавинообразно увеличивается, в резуль-

тате чего в кристалле быстро нарастает излучение, *направленное вдоль оси кристалла* (рис 22.5).

Чтобы выпускать часть этого излучения наружу, один из зеркальных торцов делают частично прозрачным. Выходящее из этого торца излучение и представляет собой луч лазера (рис 22.6).

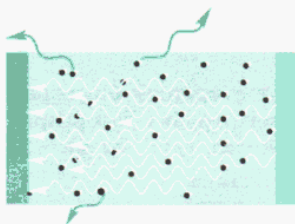


Рис. 22.5. Отражаясь от зеркальных торцов, фотоны проходят через кристалл многократно

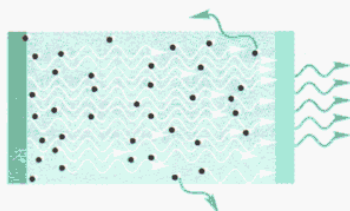


Рис. 22.6. Один из торцов лазера делают частично прозрачным. Выходящее из него излучение и представляет собой луч лазера

Таким образом, все вылетающие из лазера фотоны имеют *одинаковую частоту и одно и то же направление*.

Именно эти качества и отличают излучение лазера от всех других видов излучений.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое спонтанное излучение?
2. Что такое вынужденное излучение? Каковы свойства фотонов, излучаемых при вынужденном излучении?
3. Что такое метастабильные состояния?
4. Что такое квантовый генератор?
5. Какие квантовые генераторы называют лазерами?
6. Каков принцип действия трехуровневого лазера?
7. Зачем серебрят торцы рубинового лазера?
8. Какие вы знаете примеры применения лазеров?

§ 23. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

1. Корпускулярно-волновой дуализм
2. Вероятностный характер атомных процессов
3. Соответствие между классической и квантовой механикой

В двадцатых годах 20-го века была создана последовательная теория атомных процессов, получившая название квантовой механики. В ее основе лежит представление о вероятностном характере атомных процессов.

1. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ О ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВАХ ЧАСТИЦ

Как вы уже знаете, благодаря исследованиям Макса Планка и Альберта Эйнштейна было установлено, что свет обладает не только свойствами волн, но и свойствами частиц (корпускул).

Двойственная природа света, сочетающего несовместимые свойства волн и частиц, была в первой четверти 20-го века самой интригующей чертой физической картины мира: она ставила под сомнение сами основы классической физики. Эту двойственность назвали *корпускулярно-волновым дуализмом*¹.

В 1923 году французский физик Луи де Бройль решил пойти еще дальше: он предположил, что сочетание волновых и корпускулярных свойств присуще не только свету, а вообще *всем* видам материи. Идеи де Бройля развил австрийский физик Эрвин Шрёдингер.

Согласно гипотезе де Бройля

длина λ волны, соответствующей частице, связана с импульсом p частицы соотношением $\lambda = \frac{h}{p}$, где h — постоянная Планка.

Обоснование гипотезы де Бройля

Согласно формуле Планка $E = h\nu$, где E — энергия фотона, ν — частота волны света. Частота связана с длиной волны λ соотношением $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света, поэтому $E = \frac{hc}{\lambda}$, откуда $\lambda = \frac{hc}{E}$.

¹ От латинского *dualis* — двойственный.

Де Бройль воспользовался справедливым в электродинамике соотношением между энергией электромагнитной волны и ее импульсом: $E = pc$. Подставив это соотношение в формулу $\lambda = \frac{hc}{E}$, он получил $\lambda = \frac{h}{p}$.

ОПЫТНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ

Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц показалась многим физикам слишком радикальной. Но в 1927 году американские физики К. Дэвиссон и Л. Джермер, а также английский физик Дж. Томсон¹ обнаружили на опыте, что электроны действительно обладают волновыми свойствами.

Эти ученые наблюдали *дифракцию* электронов при прохождении сквозь кристалл и при отражении от кристалла. А явление дифракции, как известно, характерно именно для волн. Удалось даже измерить длину «электронных волн», и она оказалась именно такой, какую предсказал де Бройль.

Гипотеза де Бройля получила впоследствии опытное подтверждение для *всех* частиц (в том числе для протонов и нейтронов — частиц, из которых состоят атомные ядра).

Так было доказано, что сочетание волновых и корпускулярных свойств действительно является *общим* свойством материи.

2. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ХАРАКТЕР АТОМНЫХ ПРОЦЕССОВ

Природа корпускулярно-волнового дуализма оказалась одной из самых волнующих загадок в истории физики. Как в одном и том же объекте могут сочетаться, казалось бы, несовместимые свойства *неделимых частиц и распределенных в пространстве волн*?

Решение этой проблемы предложил в 1925 году немецкий физик Макс Борн, предположив, что законы природы в атомных масштабах носят *вероятностный* характер.

Идею Борна развили физики нескольких стран, построив последовательную теорию атомных процессов, которая получила название *квантовой механики*. Мозговым центром для создателей квантовой механики — в большинстве своем друзей и учеников Нильса Бора — стал созданный Бором Институт теоретической физики в Копенгагене.

Чтобы понять основные идеи квантовой механики, необходимо познакомиться с понятием *вероятности*. Это чрезвычайно важ-

¹ Сын Дж. Дж. Томсона, открывшего электрон.

ное понятие лежит в основе математической теории, которая называется «теория вероятностей», но мы ограничимся здесь только общим представлением о понятии вероятности.

Представление о вероятности

Слова «более вероятно» и «менее вероятно» часто используют в разговорной речи, и смысл этих слов понятен каждому.

Ученые ввели *количественную* меру вероятности. Вероятность какого-либо события равна отношению числа случаев, в которых это событие происходит, к общему числу рассматриваемых случаев.

Например, событие, которое наступает *каждый* раз, имеет вероятность 1. А событие, которое происходит в *половине* всех возможных случаев, имеет вероятность 0,5 (скажем, падение монеты «орлом»). Событие же, которое не происходит *никогда*, имеет вероятность 0.

Вероятность в классической физике

С понятием вероятности мы встречались, например, при изучении движения молекул газов. Например, определить скорость каждой молекулы газа в какой-либо момент времени невозможно. Однако, пользуясь представлением о вероятности, можно вычислить вероятность того, что скорость взятой наугад молекулы лежит в определенном интервале скоростей (скажем, от 100 до 500 м/с).

Вероятностное описание в классической физике обусловлено только неполнотой информации. Например, если бы мы могли точно определить условие бросания монетки, можно было бы достоверно предсказать, как она упадет — «орлом» или «решкой» (это было бы сложной, но в принципе разрешимой задачей).

Вероятность в атомной физике

Тщательный анализ опытов и теоретические исследования показали, что

атомные процессы имеют в своей основе вероятностную природу.

И связано это не с неполнотой информации, а с самой сутью явлений, происходящих в атомных масштабах.

Поэтому физический смысл имеет только *вероятность* обнаружить электрон в данный момент времени в определенной точке пространства или *вероятность* того, что в данный момент времени скорость электрона равна определенному значению.

Вероятностное истолкование корпускулярно-волнового дуализма

Как же вероятностный характер атомных явлений объясняет сочетание волновых и корпускулярных свойств в одном объекте? Что представляют собой частицы-волны?

Выяснилось, что волны де Бройля — это не обычные волны, а как бы волны вероятности, определяющие *вероятность* обнаружить частицу в данной точке пространства: чем больше амплитуда волны, тем больше эта вероятность.

Движение частицы представляет собой распространение волны вероятности. Поэтому и проявляются *волновые* свойства частиц, то есть явления интерференции и дифракции.

Однако в любом опыте по *обнаружению* частицы она с определенной вероятностью оказывается *целиком* в одном месте пространства, то есть проявляет свойство корпускулы.

«Волны вероятности» для электрона в атоме

На рис. 23.1 схематически изображены некоторые «электронные волны» в атоме водорода: более темная окраска соответствует областям, в которых вероятность нахождения электрона больше. Рассматривая эти рисунки, учтите, что электронная волна определяет *вероятность* нахождения *целого* электрона в той или иной точке.



Нильс Бор
(1885—1962)



Рис. 23.1. Электронные волны вероятности в атоме

3. СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКОЙ

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Согласно классической механике координаты тела и его скорость могут быть измерены *одновременно*, причем с *любой точностью*. И это действительно так для макроскопических тел, описание движения которых и было целью классической физики.

Но для микрочастиц с очень малой массой или энергией это неверно. Опыты и расчеты свидетельствуют, что измерить импульс

частицы и ее координаты одновременно невозможно, а если с большой точностью измерить импульс частицы, то после этого ее можно будет практически с равной вероятностью обнаружить в большой области пространства, то есть значения координат этой частицы станут весьма неопределенными.

И наоборот: чем точнее будет измерена координата частицы, тем большей станет неопределенность в значении ее импульса.

Взаимная неопределенность Δx в значении координаты частицы x и неопределенность Δp в значении ее импульса p определяется *постоянной Планка* — главной физической постоянной квантовой механики.

Как показывают расчеты,

произведение неопределенностей импульса частицы и ее координаты не меньше постоянной Планка: $\Delta p \Delta x \geq h$.

Это соотношение называют *соотношением неопределенностей Гейзенберга*, так как оно впервые было сформулировано немецким физиком Вернером Гейзенбергом.

Почему соотношение неопределенностей не проявляется для макроскопических тел?

Дело в том, что постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с чрезвычайно мала по сравнению с макроскопическими величинами.

Рассмотрим для примера макроскопическое тело массой 1 кг. Из соотношения неопределенностей Гейзенберга $\Delta p \Delta x \geq h$ следует, что произведение неопределенностей скорости и координаты $\Delta v \Delta x \geq \frac{h}{m}$. Значит, при $m = 1$ кг получаем $\Delta v \Delta x \approx 10^{-33}$ м²/с (мы приняли для оценки $h \approx 10^{-33}$ Дж · с).

Отсюда следует, что если даже координата нашего тела определена с огромной точностью — до размеров атома (10^{-10} м), квантово-механическая неопределенность в значении его скорости будет около 10^{-23} м/с. Столь малую неопределенность в значении скорости обнаружить невозможно, так как она лежит далеко за пределами точности всех измерительных приборов.

Итак, для макроскопических тел квантово-механические неопределенности не поддаются измерению — вот почему в макром мире не проявляется соотношение неопределенностей.

Как проявляется соотношение неопределенностей в микромире?

Рассмотрим теперь соотношение неопределенности для электрона. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг $\approx 10^{-30}$ кг, поэтому в данном случае произведение неопределенностей скорости и координаты

наты $\Delta v \Delta x \geq \frac{h}{m_e} \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Рассмотрим электрон, находящийся в связанном состоянии в атоме, — при этом электрон локализован в пределах атома, то есть для него неопределенность в координате $\Delta x \approx 10^{-10} \text{ м}$. Тогда из соотношения $\Delta v \Delta x \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ следует, что неопределенность в значении скорости электрона в атоме $\Delta v \approx 10^7 \text{ м/с}$. А это как раз и есть скорость электрона, находящегося на одной из стационарных орбит в модели атома Бора.

Как мы видим, соотношение неопределенности в атомном масштабе играет огромную роль: по существу именно этим соотношением и определяется сам *атомный масштаб*.

Обратим еще раз внимание на то, что в атоме нет «электронных орбит», напоминающих в миниатюре орбиты планет: вероятность обнаружения электрона в той или иной точке атома «размазана» как показано, например, на рис. 23.1. При этом неопределенности в значениях скорости и координаты электрона соответственно $\Delta v \approx 10^7 \text{ м/с}$ и $\Delta x \approx 10^{-10} \text{ м}$.

ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ БОРА

Проанализировав соответствие между квантовой и классической механикой, Нильс Бор сформулировал *принцип соответствия*, который стал одним из общих принципов научного познания.

Согласно этому принципу новая физическая теория, описывающая более широкий круг явлений, должна не отвергать прежнюю теорию, а включать ее в качестве предельного случая. Например, классическая механика является предельным случаем квантовой механики для больших масс частиц: когда массы объектов увеличиваются, законы квантовой механики превращаются в законы классической механики.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем состоит гипотеза де Бройля? Как согласно этой гипотезе связан импульс частицы с длиной волны, соответствующей этой частице?
2. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?
3. Как подтвердили гипотезу де Бройля на опыте?
- 4*. Известно, что длина волны де Бройля для первой частицы больше, чем для второй. Импульс какой из частиц больше?
- 5*. В чем состоит вероятностное истолкование корпускулярно-волнового дуализма?

- 6*. В чем состоит соотношение неопределенностей Гейзенберга?
- 7*. Можно ли утверждать, что электроны в атоме движутся по определенным орбитам? Обоснуйте свой ответ.
- 8*. Почему соотношение неопределенностей не проявляется для макроскопических тел?
- 9*. Как проявляется соотношение неопределенностей в микромире?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Гипотеза Планка:** свет излучается и поглощается веществом отдельными порциями — **квантами**. Формула Планка $E = h\nu$, где E — энергия кванта, ν — частота излучения. Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.
- Вырывание электронов из вещества под действием света называют **фотоэффектом**.
- **Законы фотоэффекта:** 1) количество электронов, вырываемых светом, пропорционально поглощенной энергии света; 2) **максимальная кинетическая энергия** вырванных электронов E_k линейно возрастает при увеличении частоты света; 3) когда частота света меньше некоторого определенного значения $\nu_{\min}$ (**красная граница фотоэффекта**), фотоэффекта нет.
- **Уравнение Эйнштейна** для фотоэффекта: $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$, где ν — частота падающего света, $A_{\text{вых}}$ — работа выхода электронов из данного металла, m и v — масса и наибольшая скорость вырванного светом электрона.
- Атомное ядро было открыто **Э. Резерфордом**. Размеры атомного ядра в десятки тысяч раз меньше размеров атома.
- Атом может излучать и поглощать свет только с частотами $\nu_{kn} = \frac{|E_k - E_n|}{h}$, где E_k и E_n — энергия электрона в стационарных состояниях. Изолированные атомы испускают свет только с определенными длинами волн (**линейчатый спектр**).
- При **вынужденном излучении** атом излучает фотон, имеющий точно такую же частоту и направление движения, что и падающий на атом фотон. Явление вынужденного излучения предсказал **А. Эйнштейн**.

- В основе действия *лазера* лежит лавинообразное усиление электромагнитных волн при прохождении через среду, содержащую много атомов в метастабильном состоянии.
- *Гипотеза де Бройля*: длина волны λ , соответствующей частице, связана с ее импульсом p соотношением $\lambda = \frac{h}{p}$, где h — постоянная Планка. Амплитуда волны де Бройля определяет *вероятность* нахождения частицы в данной точке пространства.
- *Корпускулярно-волновой дуализм* — сочетание в одном объекте свойств волн и частиц. Такими объектами являются, например, фотоны и электроны.
- *Соотношение неопределенностей Гейзенберга*: произведение неопределенностей импульса частицы и ее координаты не меньше постоянной Планка: $\Delta p \Delta x \geq h$.

Глава 6

АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



В начале 20-го века выяснилось, что составным является не только атом, но и атомное ядро: оно состоит из протонов и нейтронов. А во второй половине 20-го века установили, что и эти частицы являются составными: они состоят из частиц, названных кварками. Эти частицы с дробным электрическим зарядом не существуют в свободном состоянии.

Изучение атомного ядра открыло перед человечеством новые источники энергии, и сегодня во многих странах мира работают атомные электростанции. Однако открытие тайн атомного ядра принесло и новые проблемы, которые можно решить, только объединив усилия всего человечества.

§ 24. АТОМНОЕ ЯДРО

1. Строение атомного ядра

2. Ядерные силы

Атомное ядро состоит из частиц двух типов — положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов. Эти частицы назвали нуклонами¹.

Между нуклонами действуют большие силы притяжения с малым радиусом действия — так называемые ядерные силы.

1. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА

После открытия атомного ядра возник вопрос: не является ли оно *составным*? Может быть, и ядро состоит из каких-то частиц?

К изучению структуры ядра приступил уже известный вам Резерфорд. Он применил знакомый вам метод: бомбардировку α -частицами.

И этот метод снова принес открытие: в 1919 году Резерфорд обнаружил, что при бомбардировке атомов азота вылетают частицы, как две капли воды похожие на ядра атомов водорода — имеющие такие же заряд и массу. Вскоре выяснилось, что это и есть ядра водорода.

Резерфорд назвал их *протонами*².

Выяснилось, что протон имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), но масса протона оказалась примерно в 1800 раз больше массы электрона ($1,67 \cdot 10^{-27}$ кг).

Могут ли все ядра состоять только из протонов?

От этого заманчиво простого предположения пришлось отказаться практически сразу. И вот почему.

Если бы все ядра состояли только из протонов, масса ядра была бы пропорциональна его заряду, так как и масса, и заряд ядра были бы пропорциональны числу протонов. Однако на самом деле такой пропорциональности нет.

Так, масса ядра гелия (α -частицы) в 4 раза больше массы ядра атома водорода, а заряд ядра гелия всего лишь в 2 раза больше заряда ядра водорода.

¹ От латинского слова *nucleus* — ядро.

² От греческого слова «протос» — первый.

Кроме того, выяснилось, что существуют ядра с одинаковым зарядом, но разными массами. Такие ядра называли *изотопами*¹. Существование изотопов также противоречило предположению о том, что ядра состоят только из протонов: ведь в таком случае ядра с разной массой обязательно должны были бы иметь и разный заряд.

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

В массах ядер обнаружилась любопытная закономерность: массы всех ядер, в том числе изотопов, с высокой точностью были кратны массе протона.

Это навело Резерфорда на мысль, что атомное ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтральных частиц с массой, примерно равной массе протона.

Но как «поймать» эти нейтральные частицы? Ведь их очень трудно *зарегистрировать* — из-за того, что нейтральные частицы не испытывают электрических взаимодействий, они легко пронизывают вещество, или, как говорят, обладают *большой проникающей способностью*.

Поэтому открытия предсказанных Резерфордом нейтральных частиц пришлось ждать целых 12 лет. Но их все-таки обнаружили, причем именно по «главной улике» — большой проникающей способности. При облучении α -частицами атомов бериллия было зарегистрировано излучение, пронизывающее 20-сантиметровую свинцовую плиту, которая задерживала все другие виды излучений. Проходя затем через парафин, это излучение выбивало протоны большой энергии, и уже по свойствам вылетевших протонов были установлены свойства «неуловимых» нейтральных частиц.

Ученик Резерфорда Джеймс Чедвик доказал, что эти частицы являются предсказанными Резерфордом нейтральными «двойниками» протона. Вследствие их нейтральности их называли *нейтронами*.

В отличие от протона и электрона нейтрон не является стабильной частицей, то есть не может существовать сам по себе сколь угодно долго. Среднее время жизни нейтрона — около 15 минут, после чего он распадается на протон, электрон и еще одну нейтральную частицу, которую называют *антинейтрино*. Эта частица обладает намного большей проникающей способностью, чем нейтрон (рис. 24.1). О ней и ее двойнике — нейтрино — мы расскажем в § 28. *Мир элементарных частиц*.

Хотя неуловимость нейтрона задержала его открытие, она оказалась самым ценным его свойством с точки зрения практиче-

¹ От греческих слов «изос» — одинаковый и «топос» — место: элементы, имеющие ядра с одинаковым электрическим зарядом, занимают одно и то же место в Периодической системе элементов Менделеева.

ского применения. Дело в том, что, как мы увидим ниже (см. § 27. *Ядерная энергетика*), именно благодаря высокой проникающей способности нейтроны оказались наиболее подходящим средством для «зажигания» ядерных реакций в реакторах.



Рис. 24.1. Нейтрино и антинейтрино обладают настолько большой проникающей способностью, что легко «пронизывают» земной шар. Но и эти частицы физики все-таки смогли обнаружить

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА

Сразу же после открытия нейтрона советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко и уже известный вам Вернер Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра*.

Согласно этой модели

ядра всех¹ атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые получили общее название — **нуклоны**.

На рис. 24.2 схематически представлена структура наиболее легких ядер.

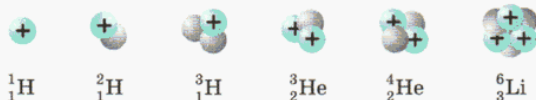


Рис. 24.2. Схематическое изображение самых легких ядер

Первые три ядра — изотопы водорода (собственно водород, дейтерий и тритий). Четвертое и пятое ядра — изотопы гелия.

Количество Z протонов в ядре называют *зарядовым числом*.

Поскольку каждый протон имеет заряд e (равный по модулю заряду электрона), заряд ядра равен Ze .

Зарядовое число равно номеру химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева. Зарядовым числом определяются химические свойства элемента.

Число нейтронов в ядре обозначают N .

¹ За единственным исключением: ядро изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$ состоит из одного протона.

Величину $A = Z + N$, равную общему числу нуклонов в данном ядре, называют *массовым числом*. Массовое число определяет относительную атомную массу химического элемента: она равна произведению массового числа на атомную единицу массы¹.

Ядро атома обозначают так же, как и соответствующий химический элемент, ставя перед ним сверху массовое число, а внизу — зарядовое число: если химический элемент обозначить X , то соответствующее ядро обозначается A_ZX .

Например, ядро углерода с массовым числом 12 и зарядовым числом 6 обозначается так: ${}^{12}_6\text{C}$, а ядро гелия (α -частица) — ${}^4_2\text{He}$. На приведенном выше рис. 24.2 под схематическими изображениями ядер указаны их обозначения. Протон и нейтрон обозначаются соответственно как 1_1p и 1_0n .

2. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Удерживать в очень малом ядре одноименно заряженные и поэтому отталкивающиеся протоны могут только очень большие силы притяжения между нуклонами. Эти силы называли *ядерными*.

Свойства ядерных сил изучают с помощью столкновений частиц высоких энергий, поэтому физику атомного ядра и физику элементарных частиц называют также *физикой высоких энергий*.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ СИЛ

Во-первых, ядерные силы *очень велики*: на расстояниях, сравнимых с размерами нуклонов, они примерно в 100 раз больше электрических сил. Только благодаря этому ядерные силы и удерживают вместе одноименно заряженные протоны.

Во-вторых, ядерные силы являются *короткодействующими*, то есть имеют очень малый радиус действия — порядка 10^{-14} — 10^{-15} м (размеры ядра). Этим ядерные силы существенно отличаются от сил электрического взаимодействия, которые заметно проявляются на расстояниях, сравнимых с размером атома (10^{-10} м).

Как мы увидим ниже, размеры ядер определяются именно радиусом действия ядерных сил.

И наконец, силы, действующие между двумя нуклонами, не зависят от их электрического заряда: два протона взаимодействуют друг с другом так же, как протон с нейтроном или два нейтрона.

Это свойство ядерных сил называется *зарядовой независимостью*. Оно позволяет рассматривать протон и нейтрон как два состояния одной и той же частицы — *нуклона*.

¹ Напомним, что атомная единица массы равна $\frac{1}{12}$ массы атома углерода ${}^{12}_6\text{C}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каком опыте было установлено, что атомное ядро является составным? Кто поставил этот опыт?
2. Из каких частиц состоит атомное ядро? Каково общее название этих частиц?
3. Что общего у протонов и нейтронов и чем они отличаются друг от друга? Какая из этих частиц является стабильной?
4. Почему пришлось отказаться от предположения, что все атомные ядра состоят только из протонов?
5. В ядре какого атома нет нейтронов?
6. Какой нуклон обладает большой проникающей способностью? С каким его свойством это связано?
7. Что такое изотопы? Приведите примеры изотопов.
8. Ядро некоторого элемента состоит из одного-единственного нуклона? Что это за нуклон?
9. Что такое зарядовое число? Как оно связано с положением соответствующего элемента в Периодической системе элементов (таблице Менделеева)?
10. Что такое массовое число? Как оно связано с относительной атомной массой?
11. Два ядра имеют одинаковое массовое число. Могут ли заряды этих ядер быть различными? Обоснуйте ваш ответ.
12. Найдите с помощью таблицы Менделеева несколько элементов, для ядер которых массовое число в 2 раза больше зарядового числа. Каково соотношение между числом протонов и числом нейтронов в таких ядрах?
13. Два ядра имеют различные заряды. Могут ли эти ядра быть изотопами одного и того же химического элемента?
14. Как обозначают атомные ядра?
15. Приведите несколько примеров обозначений атомных ядер.
16. Что такое ядерные силы?
17. Каковы основные свойства ядерных сил?
18. Какое свойство ядерных сил называют зарядовой независимостью?

§ 25. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1. Открытие радиоактивности
2. Радиоактивные превращения

Ядра многих изотопов самопроизвольно испускают частицы, превращаясь при этом в ядра других химических элементов. Это явление называют радиоактивностью.

1. ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

В 1896 году французский физик Анри Беккерель обнаружил, что соли урана самопроизвольно испускают лучи, которые засвечивают фотопластинку.

В ближайшие несколько лет французские физики супруги Мария Склодовская-Кюри (приехавшая из Польши) и Пьер Кюри установили, что подобным свойством обладают атомы и некоторых других элементов. По предложению супругов Кюри самопроизвольное излучение назвали *радиоактивностью*¹.



Мария Склодовская-Кюри
(1867—1934)



Пьер Кюри
(1859—1906)

Самым же замечательным открытием супругов Кюри было открытие нового химического элемента, который назвали *радием*. Радий содержится в урановой руде в чрезвычайно малых количествах, и чтобы добыть всего *одну десятую грамма радия*, супруги Кюри проделали титаническую работу.

Засучив рукава и не сомневаясь в успехе, будущие лауреаты Нобелевской премии день и ночь размешивали в огромных чанах урановую смолу и ставили опыт за опытом.

¹ От латинского слова *radio* — излучать.

Результат превзошел все ожидания: излучение радия в миллионы раз превосходило излучение всех ранее изученных элементов: крошечная крупинка радия массой 0,1 г выделяла в течение часа энергию, которой хватило бы, чтобы забросить футбольный мяч на пятый этаж (58 Дж). Причем такую энергию крупинка радия выделяла час за часом, оставаясь, казалось бы, совершенно неизменной.

Впору было усомниться в справедливости главного закона физики — закона сохранения энергии!

Дальнейшие исследования показали, что изменения все-таки происходят: в результате радиоактивного излучения атомы радия превращаются в атомы инертного газа радона. Однако это происходит настолько медленно, что запаса энергии в упомянутой выше крошечной крупинке радия хватило бы, чтобы поднять трех слонов на самую высокую гору Земли.

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ РАДИОАКТИВНОСТЬ РЕДКИМ ЯВЛЕНИЕМ?

В дальнейшем выяснилось, что радиоактивность — скорее правило, чем исключение: нестабильны, то есть радиоактивны, около 90 % ядер известных изотопов. Так, нестабильны все ядра с зарядовым числом $Z > 82$, то есть стабильным ядром с наибольшим числом протонов является ядро свинца ($Z = 82$).

И все же в природе существуют элементы, ядра которых имеют $Z > 82$, например инертный газ радон ($Z = 86$) или уран ($Z = 92$). Да и радий удалось обнаружить, хотя его зарядовое число равно 88. Как это объяснить?

Дело в том, что время жизни некоторых нестабильных ядер настолько велико, что они просто не успели распасться со времени своего образования: так, время жизни изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ исчисляется миллиардами лет¹.

Другие же нестабильные ядра, к числу которых относятся ядра радия и радона, сохраняются в природе только потому, что они постоянно возникают при радиоактивных распадах более тяжелых ядер (в частности, урана).

В реакторах и ускорителях физики получают сегодня нестабильные ядра с зарядовым числом $Z > 100$.

Нестабильными являются не только ядра с большим Z . Среди ядер с небольшим зарядовым числом также есть нестабильные. Например, нестабильны изотопы углерода ${}^6_{14}\text{C}$ и ${}^{11}_6\text{C}$. Среднее время жизни первого из них составляет тысячи лет, а второго — десятки минут.

¹ Когда и при каких условиях образовались химические элементы, мы расскажем в § 33. Судьбы звезд.

2. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

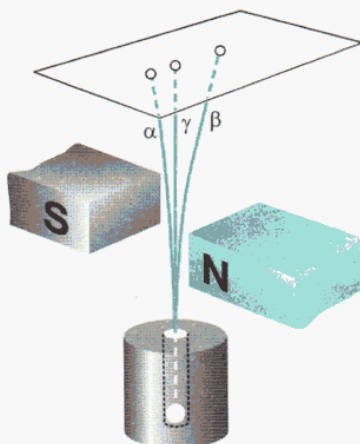
КАКИЕ ЧАСТИЦЫ ВЫЛЕТАЮТ ИЗ ЯДРА ПРИ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ?

Чтобы найти ответ на этот вопрос, Резерфорд поместил пучок вылетающих из ядра частиц в сильное магнитное поле (рис. 25.1).

Как вы знаете, в магнитном поле на движущиеся заряженные частицы действует сила Лоренца (см. § 7. *Магнитное поле*). Положительно заряженные частицы она отклоняет в одну сторону, а отрицательно заряженные — в противоположную, поэтому знак заряда частиц можно определить по тому, в какую сторону они отклоняются. А чем сильнее отклоняется частица, тем больше отношение заряда частицы к ее массе.

Рис. 25.1. Схема опыта Резерфорда

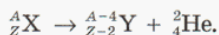
Из узкого канала, на дне которого находится частица радия, выходит направленный пучок излучения. В магнитном поле этот пучок расщепляется на три пучка, которые Резерфорд назвал α , β и γ -лучами. Дальнейшие исследования показали, что α -лучи — это поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$, β -лучи — поток быстрых электронов (электроны обозначают ${}^0_{-1}e$), γ -лучи — поток фотонов очень большой энергии (их называют γ -квантами).



ПРАВИЛО СМЕЩЕНИЯ

Найдем, как изменяются массовое и зарядовое числа ядра при α -распаде (испускании α -частиц) и β -распаде (испускании электронов).

Поскольку α -частица является ядром гелия, *уравнение α -распада в общем виде можно записать так:*



Таким образом, при α -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на две клетки ближе к началу таблицы Менделеева.

Например, уравнение α -распада радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ (рис. 25.2) имеет вид:

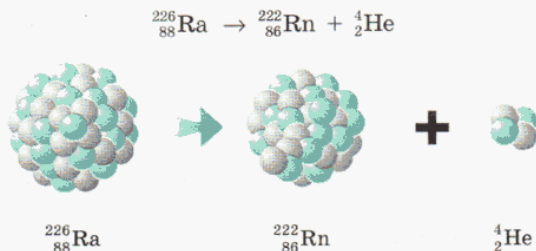
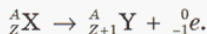


Рис. 25.2. Схематическое изображение α -распада радия

β -распад ядра обусловлен тем, что один из нейтронов распадается на протон, электрон и антинейтрино (об этом распаде мы уже рассказывали в предыдущем параграфе). Поскольку общее число нуклонов в ядре при этом остается прежним, массовое число ядра не изменяется. Заряд же ядра *увеличивается* на e , так как электрон заряжен отрицательно.

Таким образом, уравнение β -распада в общем виде



Мы видим, что при β -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на одну клетку дальше от начала таблицы Менделеева.

Например, уравнение β -распада радиоактивного изотопа свинца ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ имеет вид:



Заметим, наконец, что при γ -излучении из ядра вылетает фотон, не имеющий электрического заряда, поэтому заряд ядра не изменяется. Число нуклонов в ядре при γ -излучении также не изменяется. Следовательно, при γ -излучении ядро остается ядром того же самого химического элемента с тем же массовым числом.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

В результате радиоактивного распада число радиоактивных ядер данного изотопа постепенно уменьшается со временем.

Опыт показывает, что

для каждого вида радиоактивных изотопов существует определенный период полураспада — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа атомов.

Будем обозначать период полураспада T .

Например, период полураспада изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ равен 4,5 миллиарда лет, а изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ — «всего» 700 миллионов лет.

Период полураспада радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ по геологическим меркам очень мал: всего лишь 1600 лет, и, как мы уже говорили, радий существует сегодня на Земле только потому, что он постоянно возобновляется при радиоактивном распаде урана.

Самый долгоживущий изотоп радона имеет период полураспада чуть меньше 4 суток, но этот инертный газ постоянно присутствует в земной атмосфере, так как он образуется при распаде урана и радия в недрах Земли и просачивается сквозь почву в атмосферу. Вредный для здоровья радон скапливается в плохо проветриваемых помещениях — помните об этом.

Найдем, по какому закону уменьшается со временем число атомов N данного изотопа вследствие радиоактивного распада.

Обозначим число атомов в начальный момент ($t = 0$) как N_0 , то есть $N(0) = N_0$.

Через время $t = T$, равное периоду полураспада, число атомов будет вдвое меньше начального, поэтому $N(T) = \frac{N_0}{2}$. По истечении каждого следующего промежутка времени T число атомов уменьшается вдвое, поэтому $N(2T) = \frac{N_0}{2^2}$, $N(3T) = \frac{N_0}{2^3}$ и так далее.

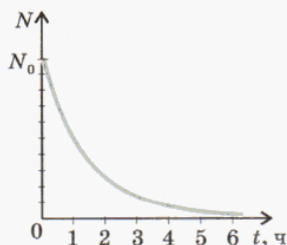
Через время $t = nT$ останется $N(nT) = N_0 \cdot 2^{-n}$ атомов. Поскольку $n = \frac{t}{T}$, получаем

закон радиоактивного распада: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$.

На рис. 25.3 приведен пример графика закона радиоактивного распада.

Рис. 25.3. График закона радиоактивного распада для случая, когда период полураспада равен 1 ч

Через 1 ч остается $\frac{1}{2}$ часть первоначального числа ядер, через 2 ч — $\frac{1}{4}$ часть и т. д. Легко подсчитать, что через 10 ч останется чуть меньше $\frac{1}{1000}$ первоначального числа ядер.



Вероятностный характер закона радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада свидетельствует о том, что «атомы не стареют», то есть *все* атомы, существующие в данный

момент, имеют одинаковые шансы распасться в течение ближайшей секунды — как те, которые образовались много лет назад, так и те, которые образовались всего лишь минуту назад.

А это означает, что распад атомного ядра происходит всегда случайно. Как вы уже знаете, именно такой — случайный, или вероятностный, — характер процессов предсказывается квантовой механикой. И хотя невозможно предсказать, когда произойдет распад данного конкретного атома, можно с большой точностью предсказать, каково будет среднее число атомов, распавшихся за данный промежуток времени, для большого числа атомов.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое радиоактивность? Кто открыл это явление?
2. Какой элемент был открыт супругами Кюри? Каково главное свойство этого элемента?
3. Является ли радиоактивность редким явлением? Приведите факты, подтверждающие ваш ответ.
4. Ядра с какими зарядовыми числами являются нестабильными?
5. Почему многие нестабильные ядра существуют до сих пор?
6. Существуют ли нестабильные ядра с небольшими зарядовыми числами?
7. Какие частицы вылетают из ядра при радиоактивном распаде? Какое свойство движения заряженных частиц в магнитном поле было использовано для того, чтобы найти на опыте ответ на этот вопрос?
- 8*. Сформулируйте правило смещения при радиоактивном распаде.
- 9*. Приведите примеры применения правила смещения.
- 10*. Что такое период полураспада? Могут ли различные изотопы одного и того же элемента иметь различные периоды полураспада? Приведите пример, подтверждающий ваш ответ.
- 11*. Запишите уравнение закона радиоактивного распада.
- 12*. Правильно ли утверждение, что если период полураспада некоторого изотопа равен 1 с, то через 10 с останется одна десятая первоначального числа ядер? Если нет, то как его можно исправить?
- 13*. В чем проявляется вероятностный характер закона радиоактивного распада?
- 14*. Должен ли выполняться закон радиоактивного распада для нескольких атомов? Обоснуйте ваш ответ.

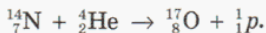
§ 26. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДЕР

1. Ядерные реакции
2. Энергия связи атомных ядер
3. Реакции синтеза и деления ядер

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при их взаимодействии друг с другом или другими частицами. Мы рассмотрим выделение и поглощение энергии в ядерных реакциях.

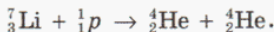
1. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Как вы уже знаете, в конце 19-го века была открыта радиоактивность — явление *самопроизвольного* распада атомных ядер. А в 1919 году Резерфорд впервые осуществил *искусственное* превращение атомных ядер: при бомбардировке азота α -частицами ядро азота превращалось в ядро изотопа кислорода с испусканием протона:



Изменения атомных ядер при взаимодействии их друг с другом или с другими частицами называют *ядерными реакциями*.

Приведем еще пример: при бомбардировке ядер лития быстрыми протонами эти ядра расщепляются на α -частицы:



УСЛОВИЯ ПРОТЕКАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ядерные реакции при столкновениях ядер

Напомним, что ядерные силы характеризуются очень малым радиусом действия. Поэтому для того, чтобы в результате столкновения двух ядер могла произойти ядерная реакция, необходимо сблизить ядра на *очень малое расстояние* — только тогда между ними начнут действовать *ядерные силы*.

Однако между положительно заряженными ядрами существуют большие электростатические силы отталкивания. Поэтому сблизиться на достаточно малое расстояние могут только ядра, летящие с *большой скоростью*. Это весьма существенное обстоятельство не позволяет пока человечеству в полной мере использовать ядерную энергию. Ниже в этом параграфе мы расскажем об этом подробнее (см. также § 27. *Ядерная энергетика*).

Из-за электростатического отталкивания ядер первые ядерные реакции удалось осуществить только тогда, когда в распоряжении

ученых оказались образующиеся при радиоактивных распадах α -частицы с большой кинетической энергией.

Ядерные реакции на нейтронах

Вскоре после открытия нейтрона итальянский физик Энрико Ферми догадался, что именно нейтрон может оказаться наиболее подходящим «инструментом» для осуществления ядерных реакций — и как раз благодаря своей высокой проникающей способности, обусловленной его нейтральностью.

Так как нейтрон не имеет электрического заряда, даже медленный нейтрон может проникнуть в ядро и вызвать ядерную реакцию. Более того, как было установлено впоследствии (в том числе самим Ферми), именно *медленные нейтроны* и являются наиболее эффективными для осуществления ядерных реакций.

Подробнее мы расскажем об этом в § 27. *Ядерная энергетика*.

ВЫДЕЛЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

При ядерных реакциях происходит выделение или поглощение энергии — суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции отличается от их кинетической энергии до реакции.

Так, в первом из приведенных выше примеров (бомбардировка азота α -частицами) суммарная кинетическая энергия протона и ядра кислорода *меньше* кинетической энергии α -частицы, налетающей на покоящийся атом азота, то есть происходит *поглощение* энергии. Во втором же примере (бомбардировка лития протонами) суммарная кинетическая энергия образовавшихся ядер гелия (α -частиц) *больше* кинетической энергии налетающего протона, то есть происходит *выделение* энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при ядерных реакциях *энергия превращается из одного вида в другой*: при поглощении энергии кинетическая энергия начальных частиц частично превращается во внутреннюю энергию ядра, а при выделении энергии — начальная внутренняя энергия ядра частично превращается в кинетическую энергию образующихся частиц.

Из курса химии вы уже знаете, что химические реакции также могут идти с поглощением и выделением энергии. Однако выделение энергии при ядерных реакциях в *миллионы раз больше*: так, при делении ядер одного *грамма* урана выделяется столько же энергии, сколько при сгорании трех *тонн* угля.

2. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Выделение или поглощение энергии в ядерных реакциях обусловлено «перестройкой» взаимодействующих нуклонов в ядрах — при этом изменяется энергия их взаимодействия. Расскажем об этом подробнее.

Как вы уже знаете, между нуклонами в ядре действуют огромные ядерные силы притяжения. Поэтому для того, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны, необходимо совершить работу, то есть сообщить ядру некоторую энергию. Такая же энергия выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов.

Энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Значение энергии связи ядра трудно рассчитать теоретически, однако тут приходит на помощь открытое Альбертом Эйнштейном соотношение между массой и энергией.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ

В 1905 году Альберт Эйнштейн создал специальную теорию относительности¹, которая, наряду с квантовой механикой, стала основой основ физики 20-го века.

Одним из важнейших следствий специальной теории относительности явилось знаменитое

соотношение между массой и энергией: покоящееся тело массой m обладает энергией $E = mc^2$, где c — скорость света.



Альберт Эйнштейн
(1879—1955)

Эта формула Эйнштейна стала своеобразным символом 20-го века. Из нее следует, что когда энергия тела изменяется на ΔE , его масса изменяется на $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$.

Для явлений, которые изучали до начала 20-го века, открытое Эйнштейном соотношение между массой и энергией не поддавалось опытной проверке: например, масса одного литра воды при нагревании от 0 до 100 °C увеличивается примерно на $5 \cdot 10^{-12}$ кг. Однако Эйнштейн предвидел, что в случаях, когда энерговыделение особенно велико (как пример он привел именно распад радия!), уменьшение массы можно будет измерить.

Опыт подтвердил это предположение, и открытое Эйнштейном соотношение между массой и энергией стало основным способом измерения энергии связи атомных ядер.

¹ Точнее было бы называть эту теорию не специальной, а «частной» теорией относительности, так как это свое название она получила после создания Эйнштейном *общей* теории относительности, ставшей современной теорией тяготения. В переводе с немецкого, который был языком науки в начале 20-го века, *speziell* означает именно «особенный, частный».

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ И ДЕФЕКТ МАСС

Из-за наличия энергии связи масса ядра $M_{\text{я}}$ меньше суммы масс составляющих его нуклонов.

Разность $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ называется *дефектом масс*. Из соотношения $E = mc^2$ следует, что энергия связи ядра связана с дефектом масс соотношением $E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2$.

Массы ядер и нуклонов удобно выражать в атомных единицах массы (а.е.м.). Напомним, что атомная единица массы равна $\frac{1}{12}$ массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$, или $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг. Вычислим в качестве примера энергию связи именно этого ядра¹.

Массы протона и нейтрона в атомных единицах массы равны соответственно $m_p = 1,00728$ а.е.м. и $m_n = 1,00866$ а.е.м. Подставляя эти значения масс в приведенную выше формулу для дефекта масс и учитывая, что для изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$ $M_{\text{я}} = 12$, получаем $\Delta M = 0,096$ а.е.м.

Исходя из этого можно, пользуясь формулой Эйнштейна, рассчитать, что при образовании одного килограмма углерода из отдельных нуклонов выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при сгорании *двух железнодорожных составов* угля.

Впрочем, частица «бы» является излишней, так как *все* ядра углерода действительно образовались в звездах из отдельных нуклонов — и при этом *действительно* выделилось то огромное количество энергии, которое мы оценили выше. Об этом мы расскажем в § 33. *Судьбы звезд*.

Сравните кусок угля, который помещается на ладони, и два железнодорожных состава угля — и вы получите представление о малости той части энергии в веществе, которая испытывает преобразование при сжигании угля.

3. РЕАКЦИИ СИНТЕЗА И ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

Для расчета энергетики ядерных реакций необходимо знать энергию связи, приходящуюся на *один* нуклон. Ее называют *удельной энергией связи*.

Из закона сохранения энергии следует, что энергия выделяется в ядерных реакциях тогда, когда внутренняя энергия ядра уменьшается.

Это значит, что при таких реакциях удельная энергия связи в ядрах — продуктах реакции — должна быть *больше*, чем в исходных ядрах (при этом в ядрах — продуктах реакции — нуклоны

¹ Для упрощения расчета будем пренебрегать массой электронов атома: ее учет приводит к несущественной поправке.

как бы сближаются по сравнению с исходными ядрами и начинают сильнее взаимодействовать между собой).

Рассмотрим теперь полученный из многочисленных опытов график зависимости удельной энергии связи от массового числа ядра (рис. 26.1).

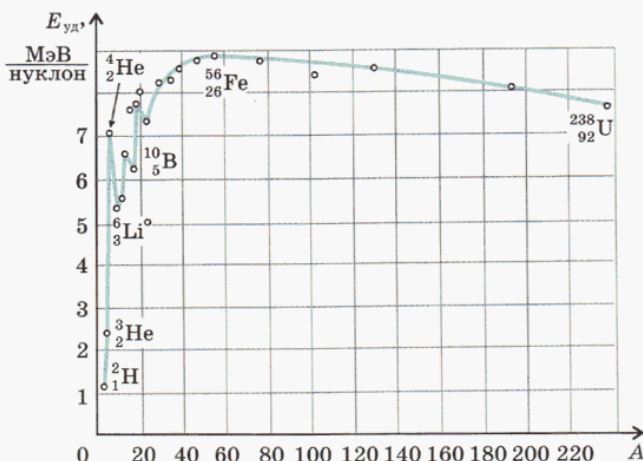


Рис. 26.1. Зависимость удельной энергии связи от массового числа ядра

РЕАКЦИИ СИНТЕЗА

Прежде всего обратим внимание на острый пик, соответствующий ядру гелия ^4_2He . Он означает, что это ядро (α -частица) характеризуется намного большей удельной энергией связи, чем ядра дейтерия ^2_1H и трития ^3_1H .

И действительно, в реакции



выделяется очень большая энергия (в расчете на один нуклон). Именно с этой реакцией, как мы увидим далее (см. § 27. Ядерная энергетика), и связывают ученые главные надежды на преодоление человечеством энергетического кризиса в будущем.

Образование ядра из менее массивных ядер называют реакцией синтеза.

Для осуществления реакции синтеза необходимо сблизить ядра на очень малое расстояние, чтобы между ними начали действовать ядерные силы. Чтобы преодолеть электрическое отталкивание, эти ядра должны двигаться с большой скоростью друг относительно друга, то есть обладать большой кинетической энер-

гией. Значит, чтобы такая реакция осуществлялась в некоторой среде, *температура этой среды должна быть очень высокой*: расчеты показывают, что реакция синтеза может идти только при температурах в десятки миллионов градусов.

По этой причине реакции синтеза называют часто *термоядерными* реакциями.

Именно такие реакции и происходят при указанных температурах в недрах звезд (в том числе и нашего Солнца), являясь основным источником их энергии. Более подробно мы расскажем об этом в § 30. *Солнце*.

На Земле термоядерную реакцию впервые удалось осуществить в водородной бомбе, которая была испытана в 1953 году в СССР. К счастью, водородную бомбу никогда не применяли в военных действиях. Сегодня ученые многих стран, в том числе и России, активно занимаются «приручением» термоядерной реакции: она была бы практически неисчерпаемым источником энергии (см. § 27. *Ядерная энергетика*).

РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ

Из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа ядра видно, что наибольшей энергией связи характеризуются ядра с массовыми числами от 50 до 60, то есть ядро железа и близких к нему по массовому числу ядер.

Отсюда следует, что при расщеплении тяжелых ядер с большим массовым числом (соответствующих элементам, находящимся ближе к концу таблицы Менделеева) на средние по массовому числу ядра удельная энергия связи увеличивается, то есть происходит выделение энергии.

Расщепление ядра на менее массивные ядра называют реакцией деления.

Как были открыты реакции деления?

В 1938 году немецкие ученые Отто Ган и Фриц Штрассман установили, что среди элементов, возникающих при облучении урана нейтронами, присутствует радиоактивный барий. А в следующем году английский физик Отто Фриш и австрийский физик Лизе Мейтнер¹ теоретически доказали, что при этом происходит *реакция деления ядер урана*.

¹ Лизе Мейтнер была замечательным физиком, однако не все могли представить себе женщину-физика: в истории науки сохранился случай, когда лекция Мейтнер, посвященная космической физике, в объявлении была названа «Проблемы косметической физики».

Дальнейшие исследования подтвердили эти выводы. Одна из реакций деления ядер такова:



Энерговыделение этой реакции около 200 МэВ. Это значит, что при делении ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется такая же энергия, как при сгорании нескольких тонн угля.

В 1940 году советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили, что ядра урана делятся не только при их облучении нейтронами, но и самопроизвольно. Однако период полураспада для спонтанного деления ядер урана огромен даже по геологическим меркам: он в миллионы раз больше времени существования Земли.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое ядерные реакции?
2. Приведите два-три примера ядерных реакций.
3. Какое условие должно быть выполнено, чтобы при столкновении ядер могла произойти ядерная реакция?
4. Почему ядерные реакции на нейтронах могут происходить и в том случае, когда нейтроны — медленные?
5. Какие превращения энергии происходят при ядерных реакциях? Выполняется ли при этом закон сохранения энергии?
6. Что такое энергия связи атомного ядра?
7. Чтобы расщепить одно ядро на составляющие его нуклоны, требуется затратить 10 МэВ, а чтобы расщепить другое ядро, требуется 15 МэВ. У какого ядра энергия связи больше?
8. Как связана масса тела с его полной энергией?
9. Что такое дефект масс?
10. Как связана энергия связи с дефектом масс?
11. Что такое удельная энергия связи?
12. У ядер каких элементов удельная энергия связи наибольшая?
13. Для какого из легких ядер удельная энергия связи особенно велика?
14. Что такое реакции синтеза? Почему их называют термоядерными? Приведите пример реакции синтеза.
15. Что такое реакции деления? Приведите пример реакции деления.

§ 27. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1. Ядерный реактор
2. Перспективы и проблемы ядерной энергетики
3. Влияние радиации на живые организмы

Вопрос о новых источниках энергии становится все более актуальным. Наиболее перспективным способом решения проблемы энергетического кризиса является использование ядерной энергии.

1. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ

При облучении ядер урана нейтронами в каждой реакции деления ядра испускаются 2—3 нейтрона.

Попадая в другие ядра урана, эти нейтроны могут вызвать новые реакции деления. В результате реакция деления станет самоподдерживающейся: число делящихся ядер может увеличиваться со временем или оставаться постоянным. Такую ядерную реакцию называют *цепной ядерной реакцией*.

Схема цепной ядерной реакции изображена на рис. 27.1.

Впервые цепную ядерную реакцию осуществил Энрико Ферми в 1942 году.



Энрико Ферми
(1901—1954)

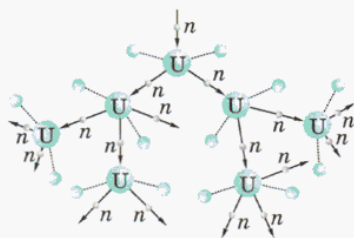


Рис. 27.1. Цепная реакция деления урана

Атомный взрыв

Если при осуществлении цепной реакции число делящихся ядер урана лавинообразно возрастает, происходит *взрыв*, при

котором практически мгновенно выделяется огромная энергия. По этому принципу устроена атомная бомба.

К несчастью, две атомные бомбы были применены в конце Второй мировой войны: в августе 1945 года самолеты США сбросили их на японские города Хиросима и Нагасаки. Эти города были практически сметены с лица Земли, а их названия стали символами разрушения атомным оружием.

Управляемая цепная ядерная реакция деления

Если в цепной реакции число делющихся ядер остается *постоянным*, реакция протекает не в виде взрыва, а *стационарно*.

Такую цепную реакцию называют *управляемой*: она может быть использована, например, для получения электроэнергии.

Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называют *ядерным реактором*.

Первый ядерный реактор был запущен в 1942 году в США под руководством Энрико Ферми, а первый в Европе — в 1946 году в СССР, где работы велись под руководством Игоря Васильевича Курчатова.

Первая в мире атомная электростанция с ядерным реактором была построена в 1954 году в СССР.



Игорь Васильевич
Курчатов
(1903—1960)

УСЛОВИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ЦЕПНОЙ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Замедлители нейтронов

Один из наиболее эффективных способов осуществления цепной ядерной реакции — деление ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$ при облучении их *медленными* нейтронами. Энергия таких нейтронов меньше, чем энергия нейтронов, образующихся при делении ядер, поэтому возникает необходимость в *замедлителях* нейтронов.

Хорошим замедлителем нейтронов является так называемая *тяжелая вода*, то есть вода, в молекулах которой атомы водорода заменены атомами дейтерия. Она намного предпочтительнее обычной воды, которая не только замедляет нейтроны, но и поглощает их.

В качестве замедлителя нейтронов используют также чистый графит — он тоже замедляет нейтроны, не поглощая их.

Замедляющие свойства дейтерия и графита обусловлены тем, что массы ядер этих веществ сравнительно невелики: благодаря этому при столкновениях с нейтронами такие ядра эффективно «отбирают» у нейтронов значительную часть их кинетической энергии. При взаимодействии же с более тяжелыми ядрами нейтроны изменяли бы свой импульс, но их энергия оставалась бы практически неизменной.

Поглотители нейтронов

Чтобы ядерная цепная реакция протекала *стационарно*, необходимо обеспечивать строгое постоянство во времени числа медленных нейтронов: если число нейтронов начнет увеличиваться, это грозит взрывом, а если начнет уменьшаться, реакция загаснет.

Для обеспечения постоянства числа нейтронов используют *поглотители* нейтронов. В качестве поглотителей обычно применяют кадмий и бор: нейтроны хорошо поглощаются ядрами этих веществ (при этом образуются их изотопы).

Из кадмия или бора изготавливают регулирующие стержни, которые вводят в рабочее пространство ядерного реактора.

Критическая масса

Наличием замедлителей и поглотителей нейтронов условия осуществления управляемой цепной ядерной реакции не ограничиваются. Необходимо еще, чтобы нейтроны, образовавшиеся при делении ядер, вызвали достаточно большое число новых реакций деления.

А это значит, что они должны пройти в веществе достаточно *большой путь*, то есть размеры образца (а следовательно, и его масса) должны быть достаточно велики.

Наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция, называют критической массой.

Для шарообразного образца чистого урана $^{235}_{92}\text{U}$ критическая масса равна примерно 50 кг. Однако ее можно уменьшить в десятки раз, используя замедлители нейтронов (для повышения вероятности того, что они вызовут ядерные реакции) и окружив образец бериллиевой оболочкой — она отражает вылетающие нейтроны в зону реакции, увеличивая их путь в образце.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

На рис. 27.2 схематически изображено устройство атомной электростанции с ядерным реактором на медленных нейтронах. В активной зоне реактора находятся ядерное топливо и замедли-

тель. Активная зона окружена отражателем и толстой защитной оболочкой из железобетона.

Реактором управляют с помощью регулирующих стержней, изготовленных из вещества, поглощающего нейтроны. При запуске реактора эти стержни медленно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнется цепная ядерная реакция, а затем с помощью этих же стержней поддерживается постоянство числа нейтронов, вызывающих деление ядер.

Тепло из горячей активной зоны реактора отводится теплоносителем (например, водой). Теплоноситель передает тепло в парогенератор, превращая воду в пар под высоким давлением. Пар вращает турбину, соединенную с генератором электроэнергии. Оработанный пар конденсируется в конденсаторе, откуда вода снова поступает в парогенератор.

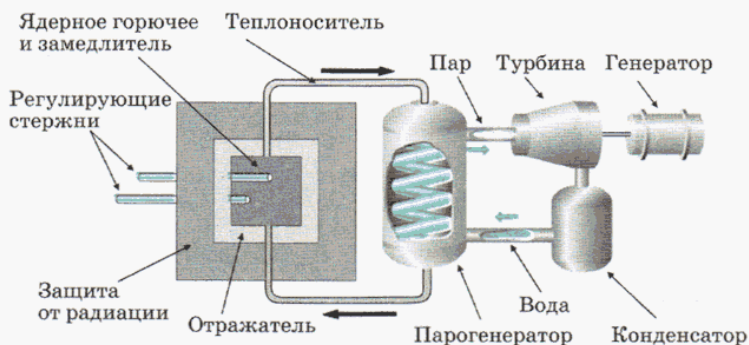


Рис. 27.2. Схема устройства атомной электростанции

2. ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В некоторых странах значительная доля всей электроэнергии уже сегодня производится на атомных электростанциях.

Атомные электростанции имеют ряд преимуществ и недостатков по сравнению с тепловыми электростанциями.

Главное преимущество атомных электростанций состоит в том, что для их работы необходимо очень малое по объему и массе количество топлива по сравнению с тепловыми электростанциями. Это значительно снижает расходы на его транспортировку.

Кроме того, запасы ядерного топлива довольно велики: по различным оценкам, их может хватить на несколько столетий.

И наконец, нормально функционирующие атомные электростанции загрязняют окружающую среду значительно меньше, чем тепловые. Так, выброс радиоактивных веществ в атмосферу при этом даже меньше, чем для тепловой электростанции, работающей на угле, так как сжигаемый в огромных количествах уголь всегда содержит примеси радиоактивных веществ, часть которых выбрасывается в атмосферу.

Главным же недостатком атомных электростанций является опасность аварий с выбросом больших количеств радиоактивных веществ в окружающую среду. В последние десятилетия 20-го века аварии произошли на нескольких атомных электростанциях, наиболее крупные — в США и СССР. Это заставило усовершенствовать систему обеспечения безопасности атомных электростанций, но и сегодня многие специалисты считают такие электростанции небезопасными.

Вторым существенным недостатком атомных электростанций является возможность использования атомных реакторов для производства материалов, из которых можно изготовить ядерное оружие. Контроль за нераспространением ядерного оружия осуществляет Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ).

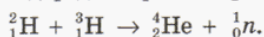
Наконец, необходимо учитывать опасность заражения окружающей среды радиоактивными отходами, образующимися при работе атомных электростанций. Их помещают в толстостенные контейнеры из нержавеющей стали, окруженные бетонной защитой, а затем погружают в глубокие шахты.

ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

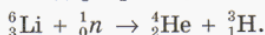
Радикальным способом решения энергетического кризиса ученые считают управляемый термоядерный синтез.

Поэтому сегодня в развитых странах, в том числе и в России, ведутся интенсивные исследования по управляемому термоядерному синтезу.

Наиболее перспективной считается упомянутая выше реакция синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития:



На Земле существуют практически неисчерпаемые запасы дейтерия (в воде морей и океанов), а тритий можно получать из жидкого лития (запасы лития также очень велики) при облучении его нейтронами благодаря реакции



Главная проблема управляемого термоядерного синтеза состоит, как мы уже говорили, в том, что синтез ядер может происходить только при очень высокой температуре — в десятки милли-

онов градусов. Такую температуру можно создать в плазме с помощью мощных электрических разрядов.

Но как удержать плазму в течение времени, достаточного для протекания реакции? Ведь при столь высокой температуре любые материалы превращаются в пар.

Принципиальное решение проблемы удержания высокотемпературной плазмы нашли советские физики лауреаты Нобелевской премии Андрей Дмитриевич Сахаров и Игорь Евгеньевич Тамм. Они предложили использовать для плазмы магнитную ловушку в форме тора (такую форму имеет бублик). Установку для осуществления управляемого термоядерного синтеза с такой магнитной ловушкой называли «Токамак»¹. В этой установке «стенками» для горячей плазмы служит магнитное поле, которому не страшна даже очень высокая температура.

В экспериментах на «Токамаках» уже сегодня идет реакция синтеза, однако ученым не удается пока добиться положительного энергетического выхода: затраты энергии превышают энергию, выделяющуюся при синтезе.

Тем не менее ученые уверены, что создание промышленного термоядерного реактора — дело ближайших десятилетий.

3. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Радиоактивное излучение (содержащее потоки гамма-квантов, электронов, протонов, нейтронов и α -частиц) вызывает ионизацию атомов, поэтому его часто называют *ионизирующим* излучением. Когда нейтральный атом превращается в ион, его химическая активность резко изменяется. В живых организмах, представляющих собой чрезвычайно упорядоченные структуры, это серьезно нарушает жизнедеятельность клеток. Поэтому при достаточно интенсивном и продолжительном воздействии радиоактивного излучения на живой организм возникает *лучевая болезнь*.

Наиболее опасны рентгеновское и гамма-излучение, так как они обладают большой проникающей способностью: задержать их может только массивная свинцовая или бетонная преграда. Поток α -частиц задерживается одеждой человека, однако попадание α -активного вещества в организм (например, с пищей) является чрезвычайно опасным.

Воздействие радиоактивного излучения на организм характеризуют *поглощенной дозой излучения* D , которая равна отношению поглощенной телом энергии E к массе тела m , то есть

$$D = \frac{E}{m}.$$

¹ Из первых букв слов «тороидальная камера с магнитными катушками».

Единицей поглощенной дозы излучения в системе СИ является *грей* (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Естественный радиационный фон, обусловленный радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами, составляет около 2 мГр в год на человека. Этот фон не представляет опасности для человека. Примерно половину общего вклада в естественный радиационный фон дает радиоактивный инертный газ радон, а также продукты его распада, попадающие в организм при дыхании. Напомним, что в закрытых непроветриваемых помещениях концентрация радона увеличивается.

Для специалистов, работающих с радиоактивным излучением, установлена предельно допустимая доза 50 мГр/год. Кратковременная же доза излучения, равная нескольким греям, может стать смертельной.

На практике используется также внесистемная единица дозы излучения — рентген (Р). Один рентген равен примерно 0,01 Гр.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое цепная ядерная реакция?
2. Что такое управляемая цепная ядерная реакция?
3. Каковы условия осуществления управляемой цепной ядерной реакции?
4. Зачем в ядерном реакторе используют замедлители нейтронов?
5. Зачем в ядерном реакторе используют поглотители нейтронов?
6. Что такое критическая масса?
7. Опишите принцип действия атомной электростанции.
8. Каковы преимущества атомных электростанций по сравнению с тепловыми?
9. Какие проблемы создает использование атомных электростанций?
10. Каковы перспективы управляемого термоядерного синтеза?

§ 28.

МИР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Открытие новых частиц
2. Классификация элементарных частиц
3. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия

Ученые продолжают поиск ответа на вопрос: из каких частиц состоит вся материя?

Путь вглубь материи не завершен: ответы на старые вопросы неизменно рождают новые вопросы.

1. ОТКРЫТИЕ НОВЫХ ЧАСТИЦ

До 30-х годов 20-го века устройство мира представлялось ученым удивительно простым: казалось, что «полный набор» частиц, из которых состоит все вещество, составляют всего три частицы: *протон, нейтрон и электрон*. Поэтому их называли элементарными.

К числу элементарных частиц относили также *фотон* — переносчик электромагнитных взаимодействий.

ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ

Представление о «простом» устройстве мира разрушилось, когда в 1932 году открыли *античастицу* электрона — частицу, которая имеет такую же массу, что и электрон, но отличается от него знаком электрического заряда. Эту положительно заряженную частицу называли *позитроном*.

В дальнейшем выяснилось, что, кроме электрического заряда, элементарные частицы могут иметь и другие заряды, также сохраняющиеся при взаимодействиях. Например, нуклоны обладают барионным зарядом. Были открыты античастицы протона и нейтрона (их называли антипротон и антинейтрон). Они обладают отрицательным барионным зарядом, а антипротон имеет отрицательный электрический заряд.

Согласно современным представлениям у каждой частицы есть *античастица*. Частица и античастица имеют одинаковую массу, но противоположные знаки всех зарядов.

Античастицы некоторых частиц совпадают с самими частицами. Примером такой частицы является фотон. Такие частицы называют *истинно нейтральными*, потому что все их заряды равны нулю.

Взаимопревращение элементарных частиц

Долгое время физики считали само собой разумеющимся, что сложные микрообъекты состоят из более простых — подобно тому, как механизм состоит из деталей.

Чтобы выяснить, из чего состоят те или иные микрообъекты, физики, начиная с Резерфорда, «прощупывали» микрообъекты, бомбардируя их быстрыми частицами. Для этого создавали мощные *ускорители*, в которых заряженные частицы разгонялись до скоростей, чрезвычайно близких к скорости света.

Однако во второй половине 20-го века выяснилось, что при столкновениях частиц высокой энергии они не «раскалываются» на более простые частицы, а вместо этого рождаются новые частицы, в том числе еще неизвестные. Массы рожденных частиц могут даже превышать массы сталкивающихся частиц.

Кроме того, оказалось, что частицы могут *превращаться друг в друга*. Например, частица и античастица при столкновении *аннигилируют*, то есть исчезают, превращаясь в другие частицы (часто этими частицами являются фотоны). При этом, однако, выполняются все законы сохранения, в том числе законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда. Например, электрон и позитрон при столкновении превращаются в два фотона.

Сотни новых частиц

Во второй половине 20-го века при исследовании космических лучей и в экспериментах на ускорителях новые частицы стали открывать *десятками*, и сегодня их число составляет уже несколько сотен. Некоторые из вновь открытых частиц чрезвычайно короткоживущие: они живут чуть больше времени, необходимого свету, чтобы пролететь сквозь атомное ядро.

Открываемые частицы по-прежнему называли элементарными. Но, как заметил еще Ферми, становилось все более очевидным, что понятие «элементарная» относится скорее к уровню наших знаний о частице, чем к истинной природе этой частицы.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Адроны и лептоны

Частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, называли *адронами*¹. Например, к числу адронов принадлежат частицы, из которых состоят атомные ядра — протоны и нейтроны. Известных

¹ От греческого «адрос» — большой, сильный. Это название предложил советский физик Л. Б. Окунь.

сегодня адронов сотни: именно они и составляют основную часть вновь открытых частиц.

Некоторые из частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях, назвали *лептонами*¹. К их числу относят, например, электрон и нейтрино.

К настоящему времени установлено существование *шести* лептонов, причем один из них (так называемый таон) оказался не таким уж «легким»: его масса почти вдвое превышает массу протона. Зато три из шести лептонов (три вида нейтрино) полностью оправдывают свое название: их масса, по современным представлениям, очень мала (у некоторых типов нейтрино она, как считается, может быть даже равной нулю).

КВАРКИ

В 60-х годах 20-го века американским физикам М. Гелл-Манну и Дж. Цвейгу удалось произвести систематизацию всех адронов, исходя из предположения, что они состоят из частиц, названных *кварками*.

Все адроны делятся на два типа — *барионы*² и *мезоны*³. Барионы (к их числу принадлежат и нуклоны) состоят из трех кварков, а мезоны (к их числу принадлежат, например, пи-мезоны, обмен которыми между нуклонами дает существенный вклад в ядерные силы) — из кварка и антикварка.

Многие эксперименты по столкновениям частиц высоких энергий можно объяснить исходя из предположения, что внутри нуклона находятся *три кварка*. Однако «освободить» кварки не удалось даже при бомбардировке нуклонов частицами очень высокой энергии. И вообще выяснилось, что кварки обладают весьма необычными свойствами.

Во-первых, они обладают *дробным электрическим зарядом*, равным $+\frac{2e}{3}$ и $-\frac{e}{3}$, где e — модуль заряда электрона. Например, протон состоит из двух кварков с зарядом $+\frac{2e}{3}$ и одного кварка с зарядом $-\frac{e}{3}$, поэтому заряд протона равен e . А нейтрон состоит из одного кварка с зарядом $+\frac{2e}{3}$ и двух кварков с зарядом $-\frac{e}{3}$, поэтому заряд нейтрона равен нулю.

¹ От греческого «лептос» — легкий.

² От греческого «барис» — тяжелый.

³ От греческого «мезос» — средний.

Во-вторых, при увеличении расстояния между кварками сила их притяжения *неограниченно увеличивается*, а при попытке разорвать связи между кварками рождаются кварки и антикварки, которые тут же объединяются в новые адроны. В некотором смысле это напоминает невозможность получить магнит с одним полюсом: попытка разломать двухполюсной магнит хотя и удастся, но при этом получатся два магнита — и каждый снова с двумя полюсами.

Взаимодействие кварков обусловлено наличием у них особого заряда, условно названного *цветом*, — он не имеет отношения к настоящему цвету и введен только для более наглядного описания взаимодействия между кварками.

Сегодня установлено существование *шести* кварков — то есть их столько же, сколько лептонов. Но это интригующее равенство еще не получило убедительного объяснения.

Каждый из шести кварков существует в трех цветовых вариантах — красный, синий и зеленый. Массы некоторых кварков намного превышают массы нуклонов.

3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

По современным представлениям *фундаментальными* частицами вещества (то есть частицами, не состоящими из других частиц) являются *лептоны* и *кварки*.

Как вы, наверное, заметили, понятием «фундаментальная частица» физики заменили понятие «элементарная частица» в надежде на то, что теперь, наконец, они добрались до «самых первоначал» материи. Однако простой подсчет показывает, что фундаментальных частиц все-таки многовато: 6 лептонов и 6 антилептонов, 18 кварков (6 кварков трех цветов) и 18 антикварков. Всего получается 48 фундаментальных частиц.

К истинно элементарным частицам относят также 13 частиц — переносчиков различных видов взаимодействий (о них мы расскажем ниже).

Итого, по современным представлениям в основе мироздания лежит 61 вид частиц. Это не намного меньше, чем число химических элементов в Периодической таблице Менделеева, поэтому многие физики считают, что они еще «в пути», то есть поиск истинных первоначал материи не завершен.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

По современным представлениям все взаимодействия в природе являются проявлениями *четырёх* видов фундаментальных

взаимодействий между фундаментальными частицами — лептонами и кварками. Каждый вид фундаментальных взаимодействий обусловлен обменом определенными частицами.

Сильное взаимодействие

Самое сильное из всех видов взаимодействий так и называется — *сильное*. Это — взаимодействие между кварками. Оно осуществляется благодаря обмену частицами, названными *глюонами*¹.

Существует восемь видов глюонов. Взаимодействие между адронами (ядерные силы) рассматривается сегодня как взаимодействие сложных составных объектов, состоящих из кварков.

Электромагнитное взаимодействие

Следующее по силе взаимодействие — *электромагнитное взаимодействие* между электрически заряженными частицами. Оно осуществляется благодаря обмену *фотонами*. Существует один вид фотонов.

Слабое взаимодействие

Следующим (по мере убывания силы) является *слабое* взаимодействие — взаимодействие между кварками и лептонами, а также между лептонами. Слабым взаимодействием обусловлен, например, уже знакомый вам распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Слабое взаимодействие осуществляется благодаря обмену тремя очень массивными частицами, которые назвали *промежуточными векторными бозонами*. Эти частицы были открыты в 80-е годы 20-го века. Масса каждой из них почти в сто раз больше массы нуклона.

Выяснилось, что слабое и электромагнитное взаимодействия — проявления единого *электрослабого* взаимодействия, и меньшая сила слабого взаимодействия по сравнению с электромагнитным обусловлена только большой массой промежуточных векторных бозонов.

Гравитационное взаимодействие

Наиболее слабым из известных взаимодействий является *гравитационное* взаимодействие.

В нем участвуют *все* без исключения частицы — не только кварки и лептоны, но и переносчики всех видов взаимодействия (например, фотоны).

¹ От английского *glue* — клей.

Согласно современным представлениям гравитационное взаимодействие осуществляется благодаря обмену частицами, названными *гравитонами*. Гравитон — единственная из «истинно элементарных» частиц, еще не открытая на опыте (этому мешает слабость гравитационных взаимодействий — они примерно в 10^{40} раз слабее электромагнитных).

Однако как ни «слаба» гравитация, именно она управляет движением планет и целых галактик. Более того: она же «зажигает» и звезды. Дело в том, что в отличие от всех других видов взаимодействий гравитационное взаимодействие *всегда* является *притяжением*, и поэтому *все* частицы испытывают гравитационное притяжение друг к другу.

Звезды зажигаются потому, что при гравитационном сжатии огромных масс температура поднимается до десятков миллионов градусов, — и тогда становятся возможными термоядерные реакции.

Подробнее мы расскажем об этом в § 33. *Судьбы звезд*.

Сколько существует частиц — переносчиков взаимодействия?

Общее число частиц — переносчиков взаимодействия равно 13 (8 глюонов, 1 фотон, 3 векторных бозона и 1 гравитон). Природа, как видно, не посчитала это число несчастливым. А может, пока еще открыты не все виды взаимодействий?

«Великое объединение»

Многие физики надеются на то, что, подобно тому как удалось объединить электромагнитное и слабое взаимодействие в единое электрослабое взаимодействие, со временем удастся построить теорию, объединяющую *все* известные виды взаимодействий.

И название для такой теории уже есть: «*великое объединение*».



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие элементарные частицы были известны в начале 20-го века?
2. Чем отличаются частица и античастица? Что у них общего? Приведите примеры частицы и античастицы.
3. Что такое аннигиляция частицы и античастицы? Приведите пример аннигиляции частицы и античастицы.
4. Что такое адроны?
5. Что такое лептоны? Сколько известно различных лептонов?
6. Что такое кварки? Какими свойствами они обладают?

- 7*. Чем отличаются барионы от мезонов? Приведите примеры барионов.
- 8*. Какие вам известны фундаментальные частицы?
- 9*. Какие вам известны фундаментальные взаимодействия?
- 10*. Какие частицы являются переносчиками фундаментальных взаимодействий?



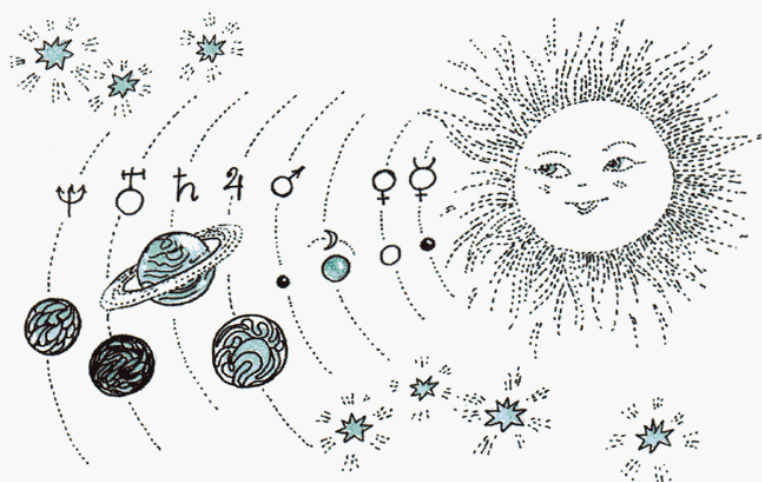
ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- Атомное ядро состоит из положительно заряженных **протонов** и нейтральных **нейтронов**.
- Силы, действующие между нуклонами в ядре, называются **ядерными силами**. Эти силы очень велики, но являются **короткодействующими**.
- При **радиоактивных распадах** испускаются: 1) α -лучи — поток ядер гелия; 2) β -лучи — поток быстрых электронов; 3) γ -лучи — поток фотонов большой энергии.
- Для каждого вида радиоактивных изотопов существует **период полураспада T** — промежуток времени, за который распадается половина начального числа атомов. **Закон радиоактивного распада**: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$.
- **Энергией связи ядра** называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны.
- **Удельной энергией связи** называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон.
- **Дефект масс**: $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$.
- **Цепная ядерная реакция** — реакция, в которой количество делящихся ядер увеличивается со временем (**атомный взрыв**) или остается постоянным (**управляемая цепная ядерная реакция** в ядерном реакторе).
- **Критическая масса** — наименьшая масса делящегося вещества, при которой возможна цепная ядерная реакция.

- У каждой частицы есть *античастица*. Частица и античастица имеют одинаковую массу, но противоположные знаки всех зарядов. Частица и античастица при столкновении *аннигилируют*, то есть превращаются в другие частицы (обычно в фотоны).
- Частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, называют *адронами*. Все адроны состоят из *кварков* — частиц, обладающих дробным электрическим зарядом. В свободном виде кварки не существуют.
- *Фундаментальными частицами*, по современным представлениям, являются кварки и лептоны.
- Между фундаментальными частицами существуют четыре вида *фундаментальных взаимодействий*: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие обусловлено обменом *глюонами*, электромагнитное — *фотонами*, слабое — *промежуточными векторными бозонами*, гравитационное — *гравитонами*. Электромагнитное и слабое взаимодействие объединены в единое электрослабое взаимодействие.

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Глава 7 СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА



В этой главе мы расскажем, как определили размер и форму Земли, измерили расстояние до Луны, Солнца и других планет.

Мы рассмотрим строение Солнца и узнаем, за счет какого источника энергии оно так щедро и так долго расточает свет и тепло.

Вы познакомитесь также с телами Солнечной системы — планетами, астероидами и кометами: узнаете, каковы их размеры, из чего они состоят, у каких из них есть атмосфера.

В заключение мы расскажем, как, по мнению ученых, сформировалась Солнечная система.



§ 29. РАЗМЕРЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

1. Земля и Луна
2. Орбиты планет
3. Размеры Солнца и планет

Форму Земли и ее размеры, а также расстояние до Луны определили древние греки. Расстояния же до Солнца и планет удалось измерить только через две тысячи лет после этого.

1. ЗЕМЛЯ И ЛУНА

ЗЕМЛЯ

Какой представляли Землю в древности

В древности Землю считали плоской и, по нынешним меркам, совсем небольшой. В те времена Земля и «небесная твердь» над ней составляли всю Вселенную (так и сегодня называют *всё*, что только существует).

Вокруг Земли вращалась «небесная твердь» с прикрепленными к ней звездами-жемчужинками, а между этой «твердью» и Землей двигались Солнце и Луна. Правда, если присмотреться внимательнее, в ночном небе можно было увидеть несколько странных ярких звезд, которые ночь от ночи чуть смещались на фоне «неподвижных» звезд. Их называли *планетами*, что в переводе с греческого означает «блуждающие».

Как узнали, что Земля имеет форму шара?

О том, что Земля — огромный шар, догадались древние греки. Живя у моря, они часто замечали, что корабль уходит за линию горизонта, как за огромный холм. Суда скрывались из виду *одинаково*, в каком бы направлении они ни плыли, и, будучи математиками, греки догадались, что Земля имеет форму шара — ведь только поверхность шара закругляется во все стороны *одинаково*.

Это открытие греков лишило смысла давний вопрос о «крае Земли»: будучи шаром, Земля просто не имеет края!

Как измерили Землю

Древнегреческий ученый Эратосфен, путешествуя по Египту, заметил, что при перемещении к югу полуденные тени предметов укорачиваются. И он догадался, как, используя это, можно найти радиус земного шара. Произведя необходимые измерения и вычисления, Эратосфен нашел, что радиус Земли (в современных

единицах длины) равен 6400 км. Это лишь на доли процента отличается от результатов современных измерений.

Последующие измерения уточнили не только размер Земли, но и ее *форму*: оказалось, что она чуть сплюснута у полюсов, что обусловлено ее вращением вокруг собственной оси. Расстояние от центра Земли до точки на экваторе примерно на 20 км больше, чем от центра до точки на полюсе.

ЛУНА

Расстояние до Луны

Первую попытку измерить расстояние до Луны предпринял в 3-м веке до нашей эры тоже греческий ученый — астроном Аристарх Самосский¹. Для этого он воспользовался наблюдениями за лунными затмениями.

Аристарх понимал, что лунные затмения происходят из-за того, что Земля отбрасывает тень на Луну. Значит, по *видимому с Земли* размеру земной тени на Луне можно определить, как далеко от Земли находится земная тень. А это и есть расстояние до Луны! Правда, земная тень не помещается на Луне полностью, так как Земля намного больше Луны, но о размерах всей земной тени можно судить по *кривизне* ее края.

Результат Аристарха Самосского уточнил впоследствии греческий астроном Гиппарх. Последующие измерения и тут внесли малую поправку². Среднее расстояние от Земли до Луны³ равно 384 400 км (примерно в 30 раз больше диаметра Земли).

Размер Луны

Как только стало известно расстояние до Луны, можно было по ее видимому размеру определить и ее радиус. Размер Луны поразил древних: ее радиус оказался равным 1740 км, то есть больше четверти радиуса Земли! Что удерживает в небе такую громаду? Не может ли она рухнуть на Землю?

Только через две тысячи лет ответы на эти вопросы дал Исаак Ньютон, открыв закон всемирного тяготения, которому подчиняется движение Луны и планет.

¹ Именно этот ученый первым высказал предположение, что Земля вращается вокруг Солнца (то есть он был предшественником Коперника).

² Мы уже говорили, что наиболее точно расстояние до Луны было измерено с помощью лазерного луча: посланный с Земли луч отразился от поставленного на Луне отражателя, и по промежутку времени, в течение которого лазерный луч шел к Луне и обратно, определили расстояние до Луны.

³ Расстояние от Земли до Луны не остается постоянным: оно изменяется от 362 000 до 405 000 км.

2. ОРБИТЫ ПЛАНЕТ

Расстояния до Солнца и планет удалось определить только в 17-м веке. Большую роль здесь сыграла предложенная в 16-м веке польским астрономом Николаем Коперником *гелиоцентрическая система мира*, то есть представление о том, что все планеты, включая Землю, движутся вокруг Солнца.

ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

В начале 17-го века немецкий астроном Иоганн Кеплер, используя данные многолетних астрономических наблюдений датского астронома Тихо Браге (сделанных *до* изобретения телескопа!), установил закономерности в движении планет, которые называли законами Кеплера¹. Используя их, Кеплер смог определить *относительные* размеры планетных орбит (например, *во сколько раз* диаметр орбиты Юпитера больше диаметра орбиты Земли).

Однако *масштаб* этой схемы (в том числе и расстояние от Земли до Солнца) оставался неизвестным. Для его определения надо было измерить расстояние до какой-нибудь *одной* планеты.

ПАРАЛЛАКС

Вы, наверное, замечали, что если смотреть на какой-либо близко расположенный предмет поочередно то левым глазом, то правым, предмет виден немного по-разному — он как бы чуть-чуть поворачивается. Это различие обусловлено *углом* между направлениями от каждого глаза к предмету (рис. 29.1). Этот угол называют *параллаксом*². По величине этого угла мозг автоматически оценивает расстояние до предмета.

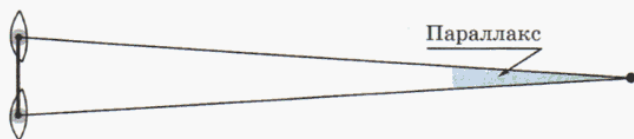


Рис. 29.1. Угол между направлениями от глаз к предмету

Подобный способ часто используют для измерения расстояния до удаленного предмета: его можно найти, измерив *базу*, то есть расстояние между точками наблюдения, и параллакс. Этот метод измерения расстояний называют *методом параллакса*.

¹ Напомним (мы рассказывали об этом в курсе физики 10-го класса), что законы Кеплера оказались для Ньютона «ключом» к открытию закона всемирного тяготения.

² От греческого «параллаксис» — отклонение.

Для измерения расстояния до планеты в качестве базы взяли расстояние между удаленными точками поверхности Земли, а роль глаз играли два телескопа, направленные на планету из разных точек земного шара (рис. 29.2). В эти телескопы планета видна в один и тот же момент времени на фоне различных участков звездного неба. Это позволяет определить параллакс для этой планеты и с его помощью найти расстояние от Земли до планеты.

Во второй половине 17-го века так измерили расстояние до Марса, что позволило определить и масштаб Солнечной системы.

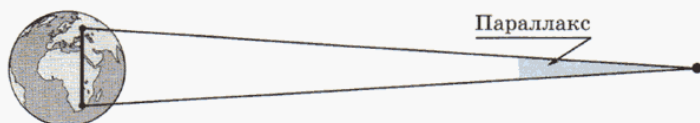


Рис. 29.2. Параллакс при рассматривании удаленного предмета из двух разных точек Земли

РАССТОЯНИЕ ДО СОЛНЦА И РАЗМЕРЫ ПЛАНЕТНЫХ ОРБИТ

Измерения показали, что *среднее расстояние от Земли до Солнца равно 149 600 000 км*. Эту величину называют *астрономической единицей*¹ (1 а. е.).

С 1930 года до конца 20-го века астрономы считали, что в Солнечной системе есть 9 так называемых больших планет, самая удаленная из которых — Плутон. Однако размеры Плутона были существенно меньше размеров всех других планет, и в начале 21-го века ученые обнаружили, что за ним находятся еще более удаленные от Солнца планеты, размеры которых сравнимы с размером Плутона. Это дало астрономам основание лишить Плутон звания большой планеты.

Сегодня считают, что

в Солнечной системе 8 больших планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (планеты перечислены в порядке удаления от Солнца).

В таблице ниже приведены расстояния от Солнца до планет, а на рис. 29.3 — схема орбит планет Солнечной системы (с соблюдением масштаба).

А далеко-далеко за орбитами больших планет находится сферический рой *комет*. Некоторые кометы движутся по чрезвычайно вытянутым орбитам, порой приближаясь к Солнцу.

Подробнее о кометах мы расскажем ниже.

¹ В приближенных расчетах 1 а. е. принимают равной 150 000 000 км.

Планета	Среднее расстояние от солнца	
	в астрономических единицах (а. е.)	в миллионах километров
Меркурий	0,39	57,9
Венера	0,72	108,2
Земля	1,00	149,6
Марс	1,52	227,9
Юпитер	5,20	778,3
Сатурн	9,54	1426,9
Уран	19,19	2871,0
Нептун	30,06	4497,1



Рис. 29.3. Схема планетных орбит

СВЕТОВОЙ ГОД

Для измерения больших расстояний астрономы часто используют время, которое необходимо свету, чтобы преодолеть эти расстояния. Напомним, что свет движется быстрее «всего на свете» — скорость света в вакууме около 300 000 км/с.

Например, от Солнца до Земли свет идет чуть больше 8 минут. А до Нептуна солнечный свет летит целых 4 часа!

Для измерения расстояний до звезд используют часто *световой год* — расстояние, которое свет проходит за один год.

Нетрудно подсчитать, что один световой год приблизительно равен 10^{13} км.

Световой год — огромное расстояние, с трудом поддающееся воображению. Но, оказывается, даже на таком расстоянии Солнечная система еще не заканчивается: упомянутый выше рой комет как раз и находится примерно на расстоянии одного светового года от Солнца.

Световыми годами, как мы увидим ниже, измеряется расстояние между звездами.

Как ни велик световой год, но это только начало знакомства с настоящими космическими расстояниями: в *главе 8. Звезды, галактики, Вселенная* нас ждут расстояния в миллионы и миллиарды световых лет!

По сравнению с такими расстояниями вся наша Солнечная система вместе с самыми удаленными кометами может показаться лишь затерянной в пространстве точкой.

Но мы не будем смотреть на Солнечную систему как на точку во Вселенной. Солнечная система уникальна тем, что именно в ней забился пульс жизни и появился человек, который смог измерить и осознать масштабы Вселенной!

Парсек

В качестве единицы измерения расстояний астрономы используют также *парсек*¹. Один парсек равен расстоянию до объекта, параллакс которого равен одной угловой секунде ($\frac{1}{3600}$ часть градуса), а размер равен диаметру земной орбиты. Один парсек равен 3,26 световых лет.

3. РАЗМЕРЫ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Зная расстояние от Земли до Солнца, можно по видимому размеру Солнца определить и его истинный размер.

Измерения показали, что радиус Солнца — около 700 000 км, то есть в 109 раз больше радиуса Земли.

Подобным же образом можно определить и размеры планет, так как в телескопы они видны как диски.

В таблице ниже приведены радиусы планет, а на рис. 29.4 и рисунке на форзаце схематически приведены размеры планет с соблюдением масштаба (Юпитер и Сатурн полностью не уместились на рисунке).

Планета	Радиус	
	в радиусах Земли	в км
Меркурий	0,38	2440
Венера	0,95	6050
Земля	1,00	6370
Марс	0,53	3390
Юпитер	11,21	71 490
Сатурн	9,45	60 270
Уран	4,01	25 560
Нептун	3,88	24 760



Рис. 29.4. Относительные размеры планет Солнечной системы

Уже при первом взгляде бросается в глаза, что четыре планеты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — намного больше всех остальных. Поэтому их называют *планетами-гигантами*. По сравнению с ними планеты так называемой *земной группы* — Земля, Венера, Марс и Меркурий — кажутся просто «малышами».

¹ От слов «параллакс» и «секунда».

Проведем сравнение

Чтобы представить относительные размеры планет и их орбит, выберем масштаб, при котором диаметр орбиты Нептуна примерно соответствует длине футбольного поля (порядка 100 метров). Для этого Солнечную систему надо было бы уменьшить в 100 миллиардов раз, то есть выбрать масштаб: в одном сантиметре миллион километров.

Тогда в центре нашего «футбольного поля» светило бы Солнце размером с вишенку, гигант Юпитер был бы размером с булавочную головку, а Землю, движущуюся на расстоянии полутора метров от Солнца, рассмотреть было бы почти невозможно — она была бы размером с пылинку.

А сколько любви и ненависти уместается на этой «пылинке»! И только на ней...



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определили форму Земли? Является ли она в точности шарообразной?
2. Чему равен диаметр Земли?
3. Во сколько раз Луна меньше Земли?
4. Кто построил схему Солнечной системы?
5. В чем состоит идея метода, с помощью которого были измерены расстояния до Солнца и планет? Как называется этот метод?
6. Чему равно расстояние от Земли до Солнца?
7. Какие планеты находятся ближе к Солнцу, чем Земля?
8. Какие планеты находятся дальше от Солнца, чем Земля?
9. Измерьте, на каком расстоянии от глаза нужно держать спичечную головку, чтобы при рассматривании одним глазом она закрывала полную Луну. Оцените, исходя из этого, размер Луны (для оценки примите расстояние от Земли до Луны равным 400 000 км).
10. Заканчивается ли Солнечная система Нептуном?
11. Что такое световой год?
12. Какие самые большие четыре планеты? Какое у них общее название?

§ 30. СОЛНЦЕ

1. Источник энергии Солнца

2. Строение Солнца

Центральной фигурой Солнечной системы является Солнце: в нем сосредоточено более 99 % массы всей Солнечной системы. Солнце является основным источником энергии в этой системе.

Свет этой ближайшей к нам звезды затмевает для нас свет всех остальных звезд Вселенной: мы видим их только ночью — когда не видно Солнца.

1. ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Температура Солнца

Температуру поверхности Солнца ученые определили еще в 19-м веке по спектру солнечного излучения — фактически по *цвету* солнечного света.

Дело в том, что цвет излучаемого нагретым телом света зависит от *температуры* тела. При повышении температуры цвет изменяется от красного к голубому: так, при температуре около 3000—4000 градусов¹ тело светит красным светом, при температуре около 6000 градусов — белым, а при еще более высокой температуре излучаемый свет становится голубоватым.

Наше Солнце светит белым светом, то есть его поверхность раскалена добела — примерно до 6000 градусов. По земным меркам это довольно высокая температура: при такой температуре все известные вещества обращаются в пар.

В 20-м веке с помощью наблюдений и теоретических расчетов ученые смогли определить температуру центральной области Солнца. И оказалось, что она в *тысячи раз* больше, чем температура его поверхности: в центре Солнца температура достигает 16 миллионов градусов.

По сравнению с таким пеклом раскаленная добела поверхность Солнца может показаться даже прохладной!

Ранние гипотезы

С давних пор ученых интересовал вопрос: за счет какой энергии Солнце так щедро и так долго расточает тепло? Ответ на этот

¹ Для таких высоких температур не имеет значения, определяем ли мы температуру по шкале Цельсия или по абсолютной шкале. Поэтому мы будем задавать ее просто в градусах, так как они говорят воображению больше, чем кельвины.

вопрос они пытались найти, используя имевшиеся у них к тому времени знания.

До 20-го века единственным известным способом получения высокой температуры было сжигание топлива, то есть химические реакции. Поэтому, естественно, ученые предположили, что Солнце «горит» в буквальном смысле слова, то есть источником его энергии являются химические реакции.

Расчеты показали, однако, что при нынешнем расходе энергии Солнце «сгорело» бы дотла в течение всего нескольких *тысяч* лет. А геологические исследования неопровержимо указывали на то, что Земля существует *миллиарды* лет. Но ведь не может же Земля быть старше Солнца!

Значит, химическое «горение» не может быть источником солнечной энергии.

И в середине 19-го века появилась новая и очень красивая идея: немецкий ученый Герман Гельмгольц предположил, что источником солнечной энергии является... гравитация. По мнению Гельмгольца, Солнце излучает энергию благодаря тому, что внешние слои Солнца продолжают «падать» к его центру, в результате чего их потенциальная энергия уменьшается, переходя во внутреннюю¹.

И действительно, расчеты показали, что запасы энергии тяготения в тысячи раз больше, чем возможные запасы энергии химических реакций. Продолжая сжиматься вследствие тяготения, Солнце могло бы оставаться таким же жарким и ярким, как сегодня, *миллионы* лет.

Но даже этот огромный промежуток времени был в тысячи раз меньше времени существования Земли, на котором «настаивала» геология: она говорила о *миллиардах* лет! Так что красивая идея Гельмгольца не смогла объяснить происхождения солнечной энергии. Нужна была новая идея.

Не будем, однако, прощаться с идеей Гельмгольца: история науки показывает, что красивые идеи не умирают.

Хотя идея Гельмгольца не объясняет, почему «горит» Солнце, она смогла объяснить, почему оно *зажглось*: сжимаясь под действием сил гравитации, огромное облако межзвездного газа разогрелось настолько сильно, что температура в его центральной области повысилась до миллионов градусов. И тогда там «вспыхнули» термоядерные реакции. Так же рождались и другие звезды.

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

В конце 30-х годов 20-го века американский физик Ханс Бете догадался, что *источником энергии Солнца и других звезд явля-*

¹ Нагревание за счет гравитационного сжатия и сегодня является главным источником энергии для Юпитера (см. § 31. *Природа тел Солнечной системы*).

ются реакции термоядерного синтеза: на этот раз расчеты показали, что энергии хватает Солнцу на миллиарды лет!

Итак, в недрах Солнца протекают термоядерные реакции. Там при температуре, исчисляемой миллионами градусов, идет термоядерный синтез ядер гелия из ядер водорода: в результате трех последовательных реакций четыре ядра водорода превращаются в одно ядро гелия.

Такое огромное энергосвечение, как у Солнца, не может, конечно, происходить без ощутимых «потерь». Напомним, что согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$ при выделении энергии ΔE масса тела уменьшается на $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$, где c — скорость света (см. § 26. Ядерные реакции и энергия связи ядер). Поэтому излучение энергии Солнцем сопровождается уменьшением его массы.

Расчеты показывают, что вследствие превращения водорода в гелий масса Солнца *ежесекундно* уменьшается более чем на 4 миллиона тонн!

Естественно, возникает вопрос: надолго ли хватит Солнца при таком «интенсивном похудении»? Не ожидает ли нас скорый конец света?

К счастью, нет: водорода в Солнце столько, что оно может (и будет!) светить с нынешней яркостью еще 5—6 миллиардов лет, то есть примерно столько же, сколько оно уже светит¹. Можно сказать, что наше Солнце находится как раз «в расцвете лет»!

Интересно, что если бы масса Солнца была *больше*, жизнь его была бы *короче* — оказывается, чем больше масса звезды, тем *быстрее* эта звезда сгорает (подробнее мы расскажем об этом в § 33. Судьбы звезд). И жизнь массивной звезды может оказаться слишком краткой для длительного процесса зарождения жизни на какой-либо движущейся вокруг этой звезды планете.

А если бы масса Солнца была *меньше*? Тогда оно светило бы *дольше*, но — менее ярко. И на Земле просто не хватило бы тепла и света, чтобы здесь возникла жизнь.

Так что нам очень повезло с нашим Солнцем: его масса как раз такая, как надо! А если бы не повезло? Мы бы об этом никогда не узнали: нас просто не было бы.

ПОЧЕМУ СОЛНЦЕ НЕ РАЗЛЕТАЕТСЯ?

Глядя с Земли на ласковое Солнце, трудно представить, что в его недрах постоянно происходит «термоядерный взрыв» чудо-

¹ Некоторые люди (особенно молодые, у которых вся жизнь впереди) испытывают потрясение, узнав впервые, что Солнце не вечно. Не переживайте: человеческая жизнь и даже вся история человечества — всего лишь мгновение по сравнению с несколькими миллиардами лет, в течение которых Солнце еще будет светить по-прежнему!

вищной силы, — взрыв, который длится уже миллиарды лет и будет продолжаться еще столько же. Почему же вследствие этого гигантского взрыва Солнце не разорвалось в клочья?

От такого «разрыва» Солнце удерживает *сила тяготения*. Она создает то огромное давление в недрах Солнца, при котором возможны термоядерные реакции (расчеты показывают, что для протекания таких реакций одной высокой температуры недостаточно — нужно еще и очень большое давление).

Таким образом, состояние «стабильного взрыва», в котором миллиарды лет пребывает Солнце и подавляющее большинство звезд, обеспечивается *балансом* между термоядерными реакциями в центре звезды и тяготением: термоядерные реакции стремятся разорвать звезду, а тяготение — еще больше сжать. И спокойная жизнь звезды продолжается до тех пор, пока такой баланс возможен. О том, что происходит, когда этот баланс нарушается, мы расскажем в § 33. *Судьбы звезд*.

2. СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

ВЫХОД ЭНЕРГИИ ИЗ НЕДР НА ПОВЕРХНОСТЬ СОЛНЦА

Изучая различные виды излучения Солнца, ученые смогли «заглянуть» внутрь нашего светила и составить довольно точное представление о его строении (рис. 30.1).



Рис. 30.1. Строение Солнца: ядро, где происходят термоядерные реакции, лучистая зона и зона конвекции

Термоядерные реакции происходят только в *ядре* Солнца, радиус которого составляет около одной трети радиуса Солнца.

Условия, при которых находится вещество в ядре Солнца, трудно представить: например, его плотность примерно в 20 раз больше плотности железа, хотя оно находится в *газообразном* состоянии! Но это, конечно, не обычный газ: атомы (не говоря уже о молекулах) при такой температуре существовать не могут — их роль исполняют атомные ядра (в основном водорода и гелия) и электроны. Но вспомните, что ядра

в сотни тысяч раз меньше атомов, и вы увидите, что даже при такой огромной плотности ядер и электронам «просторно» в ядре Солнца, то есть их действительно можно рассматривать как газ (еще точнее — как *плазму*, то есть ионизированный газ).

Из ядра Солнца вырываются рожденные в термоядерных реакциях γ -кванты огромной энергии. И если бы они достигли Земли, то сразу погубили бы все живое.

К счастью, эти γ -кванты поглощаются следующими, менее горячими слоями Солнца, которые переизлучают энергию уже в виде γ -квантов меньшей энергии, и так далее. При этом средняя энергия γ -квантов становится все меньше, но самих γ -квантов становится все больше, так как их суммарная энергия, согласно закону сохранения энергии, остается неизменной. Так, по эстафете, каждая порция энергии прокладывает себе путь сквозь еще одну треть радиуса Солнца, которую называют *лучистой зоной* (см. рис. 30.1).

Во внешней области Солнца, толщиной тоже примерно в треть его радиуса, перенос энергии наружу осуществляется уже не излучением, а *веществом*, поэтому эту область называют *зоной конвекции*¹. Нагретые массы газа поднимаются к поверхности Солнца и, охлаждаясь там вследствие излучения, опускаются снова вниз, то есть существует постоянная циркуляция вещества.

Итак, «путешествие» каждой порции энергии из недр Солнца к его поверхности — очень сложный процесс. И очень длительный: чтобы «выкарабкаться» из недр Солнца на его поверхность, каждой порции энергии требуется около *миллиона лет*.

Так что сегодня мы греемся в лучах Солнца, энергия которых «родилась» в те времена, когда человек еще только возникал как биологический вид. Однако сами эти лучи были испущены совсем недавно: они долетели до нас всего за 8 минут.

ПОВЕРХНОСТЬ СОЛНЦА

Энергия, прорвавшаяся из недр Солнца к его поверхности, заставляет ее вскипать огромными «пузырями», называемыми *гранулами*.

Размеры гранул исчисляются сотнями километров, то есть не уступают размерам среднего европейского государства.

Из Солнца то и дело вырываются *протуберанцы* (рис. 30.2 и фото на форзаце) — колоссальные огненные вихри. Высота некоторых протуберанцев в десятки раз больше земного шара.

¹ Напомним, что конвекцией называют теплопередачу посредством переноса вещества.

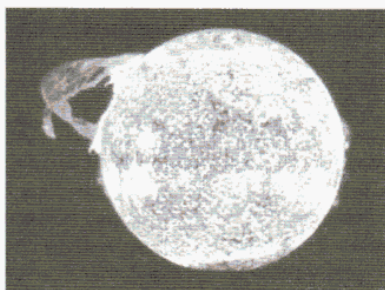


Рис. 30.2. Гигантский
протуберанец

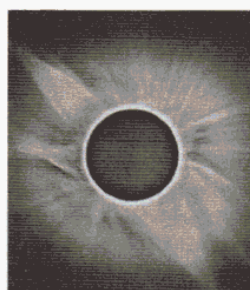


Рис. 30.3. Солнечная
корона

Но, оказывается, даже протуберанцами Солнце не «заканчивается». Во время полных солнечных затмений можно наблюдать *солнечную корону* — серебристое сияние, окружающее Солнце и простирающееся на несколько его радиусов (рис. 30.3).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какова температура поверхности Солнца и в центре Солнца?
2. Каковы были ранние гипотезы о происхождении энергии Солнца? Почему от них пришлось отказаться?
3. Какая гипотеза о происхождении энергии Солнца объяснила впоследствии рождение звезд? В чем состоит это объяснение?
4. Каков источник энергии Солнца? На сколько лет еще хватит этой энергии?
- 5*. Как изменяется масса Солнца при излучении? Чем обусловлено это изменение?
- 6*. Почему Солнце не разрывается на части?
- 7*. В какой области Солнца происходят термоядерные реакции? Как называют эту область?
- 8*. Как передается энергия из внутренних областей Солнца к его поверхности?
- 9*. Как происходит передача энергии из центральных областей Солнца наружу?

1. Планеты земной группы
2. Планеты-гиганты
3. Малые тела Солнечной системы
4. Происхождение Солнечной системы

Планеты Солнечной системы можно разделить на две группы — планеты земной группы и планеты-гиганты. У планеты каждой группы много общего.

Мы расскажем о малых телах Солнечной системы — астероидах и кометах, а также о происхождении Солнечной системы.

1. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Планетами земной группы называют четыре ближайшие к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Землю и Марс.

Эти планеты, как вы уже знаете, имеют сравнительно небольшие размеры. У каждой из них есть каменная оболочка, называемая *литосферой*¹. Средняя плотность планет земной группы в несколько раз больше плотности воды.

Общим свойством планет земной группы является также то, что они бедны спутниками: большой спутник, Луна, есть только у Земли. Два спутника Марса представляют собой каменные глыбы неправильной формы размером в несколько километров, а у Меркурия и Венеры спутников нет.

Рассмотрим теперь планеты земной группы подробнее.

МЕРКУРИЙ

Самую близкую к Солнцу и поэтому самую «быструю» планету называли Меркурием по имени древнеримского бога, который считался вестником богов, покровителем путешественников и торговли. Быстрого Меркурия изображали часто с крылышками на шлеме или на сандалиях.

Меркурий движется вокруг Солнца с рекордной для планет скоростью — почти 50 км/с — и один оборот вокруг Солнца совершает всего за 88 земных суток. Однако такой короткий год сочетается у Меркурия с чрезвычайно длинными сутками: во-первых, Меркурий очень медленно вращается вокруг своей оси, делая один оборот почти за 59 земных суток, во-вторых, так как суточное и годовое вращение планеты происходит в одном направлении, каж-

¹ От греческого «литос» — камень.

дая точка поверхности Меркурия поворачивается к Солнцу лишь один раз за два меркурианских года, то есть день и ночь длятся на Меркурии по целому году (меркурианскому).

В меркурианский полдень поверхность этой ближайшей к Солнцу планеты нагревается до температуры выше 400°C . При такой температуре скорости молекул газов сравнимы со второй космической скоростью¹ для Меркурия (примерно 4 км/с). И поэтому у Меркурия нет атмосферы: он просто не может ее удержать.

Невыносимая «дневная» жара на Меркурии сменяется лютым «ночным» холодом — до -170°C . Объясняется это двумя причинами: во-первых, отсутствием атмосферы, во-вторых, большой длительностью меркурианских дня и ночи.

Поверхность Меркурия изрыта кратерами от ударов космических тел (рис. 31.1). Один удар был так силен, что его след виден на диаметрально противоположной удару стороне планеты.

Однако не стоит особенно «жалеть» Меркурий, рассматривая эти страшные следы ударов. Это неизбежные «трудности роста» при формировании планет: поглощая попадавшие в них при столкновениях космические тела, еще «неокрепшие» планеты набирали массу, становясь так называемыми большими планетами.

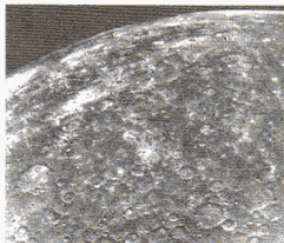


Рис. 31.1. Снимки поверхности Меркурия рассказывают о «бурном прошлом» этой планеты. Ее поверхность изрыта кратерами от ударов космических тел в период формирования Солнечной системы

ВЕНЕРА

Самая красивая и яркая планета — голубоватая Венера, названная за свою красоту именем древнеримской богини любви. Венера ближе к Солнцу, чем Земля, поэтому мы можем любоваться ею только перед восходом Солнца или сразу после захода (ее называют по этой причине утренней или вечерней звездой).

В отличие от Меркурия Венера обладает атмосферой: наличие атмосферы на Венере обнаружили с помощью телескопов несколько ученых, в их числе и российский ученый Михаил Васильевич Ломоносов.

¹ Напомним, что второй космической скоростью называют скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно навсегда покинуло окрестности планеты.

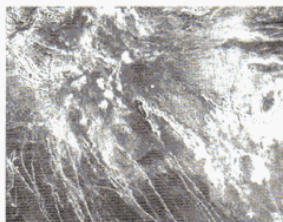
Атмосфера Венеры чрезвычайно плотная: например, давление у поверхности этой планеты в 90 раз превышает давление у поверхности Земли. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа.

Поверхность Венеры постоянно закрыта густыми облаками, состоящими из капелек серной кислоты, поэтому изучить поверхность планеты удалось только в последние десятилетия 20-го века с помощью запущенных к Венере советских и американских космических аппаратов.

Из-за парникового эффекта, обусловленного плотной атмосферой, Венера является еще более горячей планетой, чем Меркурий, причем на ней практически отсутствуют суточные и годовые колебания температуры — вблизи ее поверхности температура всегда около 450 °С.

Рис. 31.2. Поверхность Венеры

Из-за наличия атмосферы выброшенное при ударе вещество не разбрасывалось, а в расплавленном виде растекалось вокруг кратеров, сглаживая их.



Венера также подвергалась бомбардировке космическими телами, однако благодаря атмосфере следы ударов на поверхности этой планеты не так заметны (рис. 31.2).

ЗЕМЛЯ И ЛУНА

Земля

На облик нашей планеты большое влияние оказали живые организмы: в атмосфере Земли много кислорода, который появился благодаря жизнедеятельности растений. Жизнь сама защищает себя: в верхних слоях земной атмосферы из кислорода сформировался озоновый слой, который ограждает поверхность планеты от вредного для жизни ультрафиолетового излучения.

Уникальна наша планета и тем, что большая часть ее поверхности покрыта водой (рис. 31.3 и фото на форзаце). Возможно, это было одним из условий возникновения жизни.

Земля подвергалась такой же жестокой бомбардировке космическими телами, как и другие планеты, но ударные кратеры сгладились геологическими процессами, дождями и ветрами. Однако некоторые следы кратеров все-таки остались (рис. 31.4).

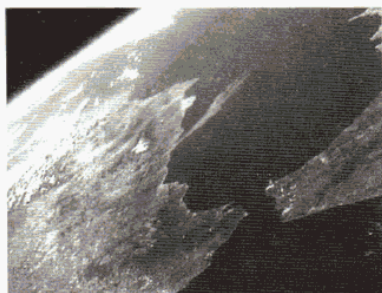


Рис. 31.3. Вид поверхности Земли из космоса

Сравните эту фотографию с фотографиями поверхности других планет. Хорошо видно, что большие участки поверхности Земли покрыты водой.

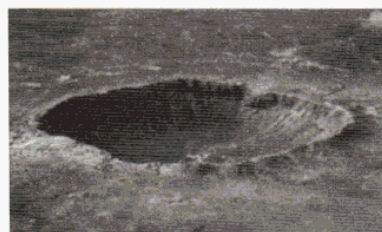


Рис. 31.4. Аризонский метеоритный кратер в США диаметром 1200 м

Предполагается, что он возник примерно 50 тысяч лет назад от падения на Землю железного метеорита массой в сотни тысяч тонн.

Земле приходилось выдерживать довольно серьезные удары — так, ученые предполагают, что почти мгновенное вымирание динозавров около 65 миллионов лет назад произошло из-за падения на Землю космического тела размером в несколько километров (то есть массой в десятки миллионов тонн).

Это сопровождалось выбросом в атмосферу огромных масс вещества и вызвало длительное похолодание.

Луна

Луна — ближайшее к Земле небесное тело, однако ее происхождение остается загадочным. Одни ученые считают, что Луна образовалась вместе с Землей, другие полагают, что она возникла вследствие столкновения с формирующейся Землей какого-то большого космического тела. Вторую возможность подтверждает компьютерный эксперимент: ученые смоделировали с помощью компьютера, как могло происходить образование Луны при таком столкновении.

Луна движется вокруг Земли, вращаясь при этом вокруг своей оси, причем эти два вращения «согласованы» так точно, что *Луна всегда обращена к Земле одной стороной*. Это согласование — не случайное совпадение, а результат действия так называемых приливных сил в течение миллиардов лет.

Приливные силы обусловлены различием в силах притяжения к Земле ближней и дальней частей Луны. Приливные силы

действуют и на Землю со стороны Луны и Солнца. Ими вызваны океанские приливы — отсюда и название этих сил.

Поверхность Луны, так же как и поверхность Меркурия, изрыта огромными ударными кратерами (рис. 31.5).

Рис. 31.5. Кратеры на Луне

Наибольшие кратеры имеют диаметр до 1000 км.



Приливные силы тормозят вращение планеты вокруг своей оси, поэтому из-за действия приливных сил Луна навсегда повернулась к Земле одной своей стороной.

Земные сутки тоже постепенно удлиняются: по некоторым оценкам за 3 миллиарда лет, прошедших со времени возникновения жизни на Земле, продолжительность земных суток удвоилась или даже утроилась.

МАРС

Эта планета была названа именем древнеримского бога войны Марса за ее красноватый оттенок, обусловленный наличием в марсианской коре оксидов железа.

На Марсе есть атмосфера, хотя давление вблизи поверхности планеты примерно в 150 раз меньше давления у поверхности Земли. Как и у Венеры, атмосфера Марса состоит большей частью из углекислого газа.

Радиус Марса примерно вдвое меньше радиуса Земли, а масса примерно в 9 раз меньше массы Земли. Однако и этой небольшой планете есть чем «гордиться»: именно на Марсе находится самая высокая гора в Солнечной системе — вулкан Олимп высотой 27 км (втрое выше самой высокой земной горы). Примечательной особенностью Марса является огромный каньон Маринер длиной почти 5000 км, шириной до 200 км и глубиной до 5 км (рис. 31.6).

Период обращения Марса вокруг своей оси почти совпадает с земными сутками, а ось вращения наклонена к плоскости орбиты примерно так же, как у Земли, поэтому на Марсе, как и на Земле, есть четыре времени года.



Рис. 31.6. Каньон Маринер выглядит на поверхности Марса как гигантский шрам

Вследствие разреженной атмосферы на Марсе сохранились многочисленные ударные кратеры.

Марс долгое время считали единственной (кроме Земли) планетой, где возможно существование жизни — хотя бы в простейших формах. Надежду на это давали так называемые марсианские каналы — видимые в телескоп линии, казавшиеся почти прямыми. Однако более поздние наблюдения, в том числе с пролетавших вблизи Марса космических аппаратов, не подтвердили наличия таких структур.

Не обнаружена жизнь на Марсе — ни в настоящем, ни в прошлом — и в ходе исследований, проведенных с помощью автоматической лаборатории, доставленной на Марс космическим аппаратом.

2. ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Напомним, что *планетами-гигантами* называют *Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун*.

Масса *любой* из этих планет во много раз превосходит общую массу *всех планет земной группы*. Однако средние плотности планет-гигантов невелики (плотность Сатурна даже меньше плотности воды). Объясняется это тем, что планеты-гиганты являются *огромными газовыми шарами*. И поэтому никому и никогда не удастся «ступить на поверхность» какой-либо планеты-гиганта. Тем не менее вследствие огромного сжатия, обусловленного гравитационными силами, у планет-гигантов есть твердые ядра.

У всех планет-гигантов имеются *спутники* (исчисляемые десятками), причем некоторые из них больше Луны. Интересно, что свойства спутников планет-гигантов во многом сходны со свойствами планет земной группы — в частности, многие из них имеют твердую оболочку.

Кроме того, все планеты-гиганты окружены *кольцами*, состоящими из огромного множества мелких космических тел.

Рассмотрим наиболее характерные особенности двух самых больших планет-гигантов — Юпитера и Сатурна.

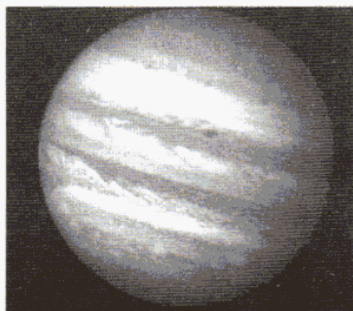
ЮПИТЕР

Юпитер — не просто самая большая планета Солнечной системы: его масса почти в три раза больше *общей* массы *всех* остальных планет! Поэтому «царь планет» и был назван именем «главного» древнегреческого бога.

Несмотря на такую огромную массу, Юпитер вращается вокруг своей оси быстрее всех «маленьких» планет земной группы, совершая полный оборот меньше чем за 10 часов. При этом вращается Юпитер не как твердое тело: период обращения экваториальных областей несколько меньше, чем приполярных.

На поверхности Юпитера видны идущие вдоль его параллелей полосы (рис. 31.7). Они обусловлены скорее всего большой скоростью вращения: вблизи экватора газообразная поверхность Юпитера движется со скоростью более 40 000 км/ч.

Рис. 31.7. Полосы на поверхности Юпитера, обусловленные быстрым суточным вращением планеты



У Юпитера около трех десятков спутников. Четыре самых больших спутника были открыты еще Галилеем; самый крупный из них даже больше Меркурия, который считается большой планетой. С таким обилием спутников (сходных к тому же с планетами земной группы) Юпитер напоминает Солнечную систему в миниатюре. Это сходство усиливается также тем, что *Юпитер является источником энергии*: как показали измерения, он излучает почти в два раза больше энергии, чем получает от Солнца.

Источник энергии Юпитера именно тот, какой предложил Гельмгольц для объяснения происхождения солнечной энергии и где он оказался неправ (см. § 30. *Солнце*). То, что не «пригодилось» для Солнца, пригодилось для Юпитера: он излучает энергию за счет продолжающегося сжатия планеты под действием сил тяготения.

Как вы уже знаете, именно такое сжатие «зажигает» звезды. Так что Юпитер, в некотором смысле, является несостоявшейся

(из-за слишком малой массы) звездой. Отметим также звездный химический состав Юпитера: он, как и большинство звезд (в том числе и Солнце), состоит почти целиком из водорода и гелия.

САТУРН

Самая яркая особенность Сатурна — роскошное кольцо, открытое еще Галилеем (рис. 31.8 и фото на форзаце).

Долгое время загадкой было то, что примерно раз в 15 лет это кольцо исчезало. Как оказалось, дело в том, что каждые 15 лет кольцо Сатурна поворачивается к Земле ребром, и тогда разглядеть его очень трудно.



Рис. 31.8. Система Сатурна: видны кольцо и три спутника (светлые точки в нижней части снимка). В верхней части снимка кольцо частично закрыто тенью Сатурна. Можно увидеть также тень от спутника (темная точка)

В течение нескольких веков кольцо Сатурна считали сплошным, но в 19-м веке известный вам Максвелл доказал, что оно должно состоять из отдельных частиц, так как сплошное кольцо было бы давным-давно разорвано мощными приливными силами, действующими со стороны огромного Сатурна.

В конце 19-го века предсказание Максвелла подтвердил российский ученый А. А. Белопольский, исследовав спектр отраженного кольца света.

3. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

АСТЕРОИДЫ

Между орбитами Марса и Юпитера обращаются миллионы мелких планет и небольших космических тел неправильной формы. Их называли *астероидами*¹. Некоторые астероиды даже «обзавелись» астероидами-спутниками (рис. 31.9).

Общая масса астероидов не превышает одной тысячной массы Земли, причем половина этой массы сосредоточена в трех самых крупных астероидах (диаметр наибольшего из них около 1000 км).

¹ В переводе с греческого — звездоподобные.

Рис. 31.9. Астероид Ида длиной около 55 км со своим крошечным спутником (светлая точка в правой части снимка)



Еще сравнительно недавно считалось, что астероиды — это остатки планеты, находившейся некогда между Марсом и Юпитером и разрушенной в результате космической катастрофы. Но сегодня ученые пришли к выводу, что астероиды — это зародыши несостоявшейся планеты. Объединиться в одну большую планету астероидам помешали приливные силы, действующие со стороны близкого и очень массивного Юпитера: они безжалостно разрывали сколько-нибудь крупное образование.

КОМЕТЫ

Мы уже говорили о кометах, рассказывая о размерах Солнечной системы. Самая примечательная особенность кометы — огромный хвост, длина которого составляет порой десятки миллионов километров (рис. 31.10).

Рис. 31.10. Хвост кометы образуется при испарении льда и замерзших газов, содержащихся в ядре кометы

Вследствие давления солнечного света и солнечного ветра (потока испускаемых Солнцем частиц) хвост кометы направлен всегда от Солнца.



4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Современные представления об образовании Солнечной системы восходят к предположению немецкого ученого Иммануила Канта, что Солнце и планеты формировались *одновременно* из единого вращающегося облака. Большой вклад в развитие теории происхождения Солнечной системы внес советский ученый и популярный исследователь Отто Юльевич Шмидт.

Как считают сегодня ученые, Солнечная система образовалась примерно 4,6 миллиарда лет назад из холодного газопылевого облака, состоящего в основном из водорода и гелия с небольшой

примесью (не более 3 % массы) других веществ. Сжимаясь вследствие тяготения, это *протопланетное облако* превратилось в диск, в центре которого образовалось Солнце, а на периферии — планеты.

Продолжая сжиматься, центральная часть облака нагрелась настолько, что в ней начались ядерные реакции, то есть она превратилась в *звезду* (подробнее об эволюции звезд мы расскажем в § 33. *Судьбы звезд*).

Вспыхнув, Солнце сильно нагревало ближайшие к нему части формирующейся планетной системы. В результате летучие водород и гелий из этой области почти полностью улетучились, переместившись на периферию Солнечной системы, где сформировались планеты-гиганты. Это объясняет сходство химического состава этих планет и Солнца. В сравнительной же близости от Солнца остались в основном тугоплавкие вещества, из которых и состоят планеты земной группы.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система почти полностью состоит из водорода и гелия — на долю всех остальных элементов приходится около 3 % массы. Если же говорить не о массе, а о *числе* атомов, то окажется, что из каждых 1000 атомов почти 920 — это атомы водорода, а 80 — атомы гелия; на долю же *всех* остальных атомов приходится не более *одного атома из тысячи*.

Стоит ли уделять внимание этому одному атому из тысячи?

Планеты из «редких» атомов

Стоит, потому что из этих столь редких в Солнечной системе атомов состоим *мы сами*! Да и наша Земля (как и остальные планеты земной группы) практически вся состоит из них.

Может показаться странным, что на создание всех этих планет хватило менее одной тысячной доли всех атомов Солнечной системы. Но вспомните, как ничтожно малы массы планет земной группы по сравнению с массой планет-гигантов, состоящих в основном из водорода и гелия, не говоря уже о массе Солнца, которое состоит из водорода и гелия почти целиком.

Откуда взялись химические элементы тяжелее гелия?

Теперь, когда мы понимаем, как жизненно (в буквальном смысле слова) важны для нас эти элементы, зададимся вопросом: где и как они возникли?

Как показывают расчеты, в Солнечной системе они никак не могли возникнуть, потому что для создания этих элементов из более простых (то есть водорода и гелия) нужны огромные температура и давление — намного превосходящие даже те, которые

существуют в недрах Солнца. Значит, эти элементы уже изначально присутствовали в том газопылевом облаке, из которого образовалась когда-то Солнечная система. Но как они попали в это облако?

Как мы скоро увидим, такие элементы попадают в газопылевые облака только при *взрывах звезд*, то есть наша Земля и мы сами состоим из элементов, «испеченных» в адском пекле звезд, взорвавшихся миллиарды лет назад.

Более подробно мы расскажем об этом в *главе 8. Звезды, галактики, Вселенная*.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите планеты земной группы.
2. Что общего у планет земной группы?
3. Почему ударные кратеры на Меркурии сохранились лучше, чем на других планетах?
4. Каковы основные свойства Венеры? Почему температура на поверхности этой планеты так высока?
5. Какое влияние оказала жизнь на атмосферу нашей планеты?
6. На Земле мало ударных кратеров. Значит ли это, что она не подвергалась интенсивной бомбардировке космическими телами?
7. Почему Луна обращена к Земле все время одной стороной?
8. Каковы основные свойства Марса? Есть ли указания на наличие жизни на Марсе — в настоящем или прошлом?
9. Каковы общие свойства планет-гигантов?
10. Являются ли астероиды обломками разрушенной планеты?
11. Как образовалась Солнечная система?
12. Каков химический состав Солнечной системы?
13. Как в Солнечной системе появились химические элементы тяжелее гелия?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- *Радиус Земли* около 6400 км, *радиус Луны* 1740 км.
- Среднее расстояние от Земли до Луны 384 400 км. Луна всегда обращена к Земле одной стороной.
- Среднее расстояние от Земли до Солнца 149 600 000 км. Эту величину называют *астрономической единицей (1 а. е.)*.

- **Большие планеты Солнечной системы** в порядке их удаления от Солнца: *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун*.
- Кроме больших планет в Солнечной системе есть *астероиды* и *кометы*. Орбиты большинства астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера.
- Расстояние, которое свет пролетает за один год, называют *световым годом*. Световой год приблизительно равен 10^{13} км.
- **Радиус Солнца** примерно 700 000 км (в 109 раз больше радиуса Земли).
- **Температура поверхности Солнца** около 6000 К. В центре Солнца температура около 16 миллионов градусов.
- **Источником энергии Солнца** являются реакции термоядерного синтеза. Вследствие выделения энергии масса Солнца ежесекундно уменьшается более чем на 4 миллиона тонн.
- **Планеты земной группы: Меркурий, Венера, Земля и Марс.** У них есть литосфера — твердая каменная оболочка. На всех этих планетах, кроме Меркурия, есть атмосфера (давление атмосферы на Венере примерно в 100 раз больше, чем на Земле, а на Марсе — в 150 раз меньше, чем на Земле).
- **Планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.** Они представляют собой огромные газовые шары с твердыми ядрами. У всех планет-гигантов есть спутники и кольца. Кольца не сплошные и состоят из отдельных малых космических тел.
- Согласно современным представлениям *Солнце и планеты формировались одновременно* из единого вращающегося газопылевого облака. Солнечная система образовалась примерно 4,6 миллиарда лет тому назад.
- **Солнечная система** почти полностью состоит из *водорода* и *гелия* — на долю всех остальных веществ приходится около 3% массы. Планеты земной группы состоят в основном из этих более тяжелых элементов. Они попали в облако, из которого образовалась Солнечная система, в результате взрыва сверхновой звезды.

Глава 8

ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, ВСЕЛЕННАЯ



Мы расскажем в этой главе, как измерили расстояния до звезд, чем звезды отличаются друг от друга, а также чем определяется «судьба» звезды. Вы узнаете, чем отличаются белые гиганты от красных, что общего у белых и красных карликов, а также что представляют собой черные дыры, которые не выпускают наружу даже свет.

Звезды объединены в огромные звездные системы — галактики. Мы расскажем о нашей Галактике — Млечном Пути, о скоплениях галактик, крупномасштабной структуре Вселенной и достигнем границ наблюдаемой Вселенной, находящихся от нас на расстоянии миллиардов световых лет.

В заключение мы рассмотрим гипотезы о происхождении Вселенной.

§ 32. РАЗНООБРАЗИЕ ЗВЕЗД

1. Расстояния до звезд
2. Светимость и температура звезд

Мы расскажем о том, как были измерены расстояния до звезд, и опишем основные типы звезд.

1. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЕЗД

РАССТОЯНИЯ ДО БЛИЖАЙШИХ ЗВЕЗД

Звезды настолько далеки от нас, что даже в хорошие телескопы они видны как светящиеся точки¹.

Расстояния до звезд смог оценить еще Ньютон во второй половине 17-го века. Он предположил, что звезды — это очень удаленные солнца², и задался вопросом: на какое расстояние надо удалить Солнце, чтобы оно казалось звездой средней яркости? Полученный ответ поразил самого ученого: оказалось, что даже ближайшие звезды в *сотни тысяч раз* дальше от нас, чем Солнце!

В первой половине 19-го века астрономы сумели измерить расстояния до ближайших звезд *методом параллакса*, то есть наблюдая звезду из различных точек, расстояние между которыми называют базой (см. § 29. *Размеры Солнечной системы*). Но на этот раз базой служил не диаметр Земли, а намного больший *диаметр орбиты Земли* (рис. 32.1).

Звезду наблюдали с интервалом в полгода и измеряли угол между разделенными полугодом направлениями на звезду (его называют годовым параллаксом).

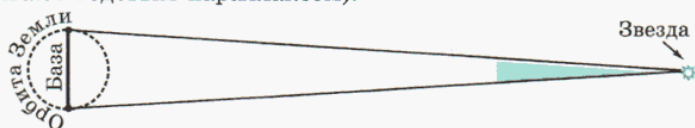


Рис. 32.1. Годовой параллакс

Одно из первых измерений расстояний до звезд произвел российский астроном Василий Яковлевич Струве.

Сегодня измерены расстояния до всех ближайших звезд. При этом выяснилось, что ближайшая к нам звезда, как ни странно, не видна невооруженным глазом: разглядеть ее можно только в хороший телескоп. Она находится в созвездии Кентавра (или,

¹ В последние десятилетия появились телескопы, позволяющие рассмотреть некоторые звезды-гиганты: эти звезды выглядят как крошечные диски.

² Именно за такое «еретическое» предположение в 1600 году инквизиция отправила на костер итальянского ученого Джордано Бруно.

как его еще называют, Центавра) и называется *Проксима*¹ *Центавра*. Эта тусклая звезда — красный карлик, который загадочно «подмигивает»: всего за несколько минут блеск этой звезды может измениться вдвое.

Чуть дальше нее находится очень яркая звезда Альфа Центавра — эта третья по яркости звезда всего неба сходна с нашим Солнцем, но наблюдать ее можно только в Южном полушарии. Зато почти все жители Земли могут любоваться *самой* яркой звездой всего неба — *Сириусом*². Она находится тоже довольно близко (по звездным масштабам): ее от нас отделяет 8,7 световых лет.

Светимость звезды

Как вы уже знаете, самая близкая к нам звезда (не считая Солнца) не видна невооруженным глазом. И в то же время некоторые звезды, находящиеся в сотни раз дальше, нам кажутся очень яркими. Причина в том, что у них намного больше *мощность излучения*.

Мощность излучения звезды называют светимостью.

Видимая яркость звезды зависит от светимости звезды и от расстояния до нее. Поэтому если известно расстояние до звезды, то по видимой ее яркости можно определить светимость.

За единицу светимости принимают светимость Солнца. У многих ближайших к нам звезд светимость значительно меньше, чем у Солнца, то есть значительно меньше 1. Но среди «ближних» звезд есть и такие, светимость которых намного выше, чем у Солнца. Так, светимость Сириуса равна примерно 20, то есть мощность излучения Сириуса в 20 раз больше мощности излучения Солнца.

Однако Сириус — далеко не «чемпион» по светимости: известны звезды, которые превосходят Солнце по светимости в сотни тысяч и даже миллионы раз. Такова, например, звезда Денеб — она находится на расстоянии около 3000 световых лет от нас, но является одной из самых ярких звезд на нашем небе.

Однако нам, живущим вблизи «скромного» Солнца, не стоит завидовать предполагаемым жителям планетной системы Денеба: их *нет*, потому что срок жизни этого сверхгиганта так краток, что возле него не может зародиться жизнь. И сравнительно скорый конец его, как мы узнаем из дальнейшего, будет ужасен.

КАК БЫЛИ ОПРЕДЕЛЕНЫ РАССТОЯНИЯ ДО ДАЛЕКИХ ЗВЕЗД?

Еще в конце 16-го века астрономы заметили, что яркость некоторых звезд периодически изменяется (с периодом от нескольких часов до нескольких суток).

¹ В переводе с греческого — ближайшая.

² В переводе с греческого — опаляющий.

Одно из объяснений такого изменения яркости звезды в том, что около нее обращается другая звезда, и каждая из звезд время от времени «затмевает» для нас свет своей соседки. Такие пары взаимодействующих звезд (двойные звезды) мы рассмотрим подробнее в § 33. *Судьбы звезд*.

Но есть звезды, у которых периодически изменяется *светимость*. Их называли *цефеидами*, поскольку первые изученные звезды такого типа находились в созвездии Цефея. Разгадку цефеид удалось найти только во второй половине 20-го века. А в начале 20-го века американский астроном Генриэтта Ливитт обнаружила закономерность в поведении этих звезд, благодаря которой их называли маяками Вселенной, так как с помощью цефеид удалось определить расстояния до более далеких звезд, когда метод параллакса не давал результата.

Ливитт заметила, что чем больше светимость цефеиды, тем больше период изменения ее блеска. А это означало, что по периоду и *видимой* яркости звезды можно определить, насколько далеко от нас находится эта звезда. И если она находится в звездном скоплении, то мы при этом определяем расстояние и до других звезд этого скопления.

2. СВЕТИМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА ЗВЕЗД

ДИАГРАММА «ТЕМПЕРАТУРА — СВЕТИМОСТЬ»

Главными свойствами звезд являются *светимость* и *температура*, определяемая цветом звезды. В начале 20-го века датский астроном Эйнар Герцшпрунг и американский астроном Генри Рессел решили выяснить: *как связана светимость звезды с ее температурой?*

Каждая звезда имеет определенную температуру и светимость, поэтому она может быть представлена точкой на координатной плоскости, «координаты» которой соответствуют температуре и светимости звезды (рис. 32.2). Полученную диаграмму будем называть диаграммой «температура — светимость»¹.

Герцшпрунг и Рессел заметили, что почти все точки — представители звезд сгруппировались в несколько областей, главные из которых обозначены на рис. 32.2.

Расскажем о звездах, принадлежащих этим областям.

Главная последовательность:

от красных карликов до голубых гигантов

Из левого нижнего угла диаграммы в верхний правый угол тянется полоса, в которую попадает, по разным оценкам, от 90

¹ В оригинальных исследованиях Герцшпрунга и Рессела вместо температуры поверхности звезд использовались их «спектральные классы» (соответствующая диаграмма называется диаграммой Герцшпрунга — Рессела). Однако использование температуры звезд делает диаграмму более наглядной.

Рис. 32.2. Диаграмма «температура — светимость»

Показаны три области, в которых лежит подавляющее большинство звезд: главная последовательность, красные гиганты и белые карлики.



до 99 % всех звезд. Поэтому эту полосу называют *главной последовательностью*. Наше Солнце также принадлежит главной последовательности (его положение обозначено на диаграмме).

Что же объединяет звезды, принадлежащие главной последовательности? Ведь в этой последовательности есть очень разные звезды: в нижней ее части находятся *красные карлики* — так называют красноватые, то есть сравнительно холодные, звезды с малой светимостью, в середине — звезды типа нашего Солнца, а в верхней части — *голубые гиганты* — горячие звезды с огромной светимостью.

Однако у всех этих звезд есть общее свойство:

чем выше температура звезды, тем больше ее светимость.

Такая простая взаимосвязь между температурой звезды и ее светимостью может показаться на первый взгляд совершенно очевидной. Однако очевидности здесь нет, так как существуют звезды с низкой температурой и большой светимостью и наоборот — звезды с высокой температурой и малой светимостью. Именно они и заполняют две другие «населенные» области на диаграмме «температура — светимость». Это *красные гиганты* и *белые карлики*. Что же они собой представляют?

Красные гиганты

Звезды, «насевающие» область вверху слева на диаграмме «температура — светимость», имеют сравнительно низкую температуру поверхности — существенно ниже температуры поверхности Солнца, однако светимость их может в десятки тысяч раз превос-

ходить светимость Солнца. Ясно, что такую огромную светимость «холодная» звезда может иметь только благодаря колоссальным размерам. Поэтому такие звезды называли красными *гигантами*.

Это действительно гиганты, даже по звездным масштабам: диаметр некоторых красных гигантов *в сотни раз превосходит диаметр Солнца*, то есть их диаметры сравнимы с диаметрами орбит Земли и Марса. Однако масса многих красных гигантов не намного отличается от массы Солнца. Отсюда можно сделать вывод, что красные гиганты почти «пустые»: их средняя плотность в тысячи раз меньше плотности окружающего нас воздуха.

Белые карлики

В середине нижней части диаграммы «температура — светимость» находятся горячие звезды — температура их поверхности намного выше температуры Солнца. Однако светимость этих звезд может быть в сотни раз меньше светимости Солнца. Такое сочетание высокой температуры с малой светимостью может означать только одно: эти звезды *очень малы*. Поэтому их называют *белыми карликами*.

И это действительно карлики — конечно, по звездным масштабам: многие белые карлики не больше *Земли*. Однако масса у белых карликов вполне звездная — она сравнима с массой *Солнца*. Отсюда следует, что плотность белых карликов в миллионы раз превышает плотность воды: наперсток вещества белого карлика имеет массу в несколько *тонн*. Но и это, как мы увидим, еще далеко не предел для плотности вещества.

Чем объясняется разнообразие звезд?

Как мы видим, анализ взаимосвязи между температурой звезды и ее светимостью позволил выявить

три основные группы звезд: звезды главной последовательности, красные гиганты и белые карлики.

Такая группировка звезд на диаграмме «температура — светимость» наводит на мысль, что каждая группа звезд характеризуется общностью физических явлений, протекающих в звездах одной группы. Для звезд же разных групп эти явления различны. Как мы увидим в § 33. *Судьбы звезд*, это действительно так: например, звезды каждой группы характеризуются своим «источником энергии».

Но самое интересное состоит в том, что *одной и той же звезде* суждено на своем веку побывать и звездой главной последовательности, и красным гигантом, и белым карликом!



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как Ньютон оценил расстояния до звезд?
2. Во сколько примерно раз расстояние от Солнца до ближайших звезд больше, чем расстояние от Земли до Солнца?
3. Как измерили расстояния до ближайших звезд?
4. Каково расстояние до ближайших звезд в световых годах?
5. Что такое светимость звезды?
6. На каком расстоянии от Земли находится звезда, светимость которой принимают за единицу светимости?
7. Если одна звезда ярче другой, означает ли это, что первая звезда ближе? Обоснуйте ваш ответ.
8. Отражает ли видимая яркость звезды ее светимость? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
- 9*. Какие звезды называют цефеидами? Как используют наблюдения за цефеидами для определения расстояний до далеких звезд?
- 10*. В каких областях на диаграмме «температура — светимость» сосредоточены звезды? Охарактеризуйте эти области.
- 11*. Как связаны температура и светимость звезды для звезд, принадлежащих главной последовательности?
- 12*. Чем отличаются красные карлики от красных гигантов? Какие из них лежат на главной последовательности?
- 13*. Что общего у красных карликов и голубых гигантов?
- 14*. Чем обусловлена высокая светимость красных гигантов?
- 15*. У каких типов звезд размер может быть близок к размеру Земли, а масса — к массе Солнца?
- 16*. Какие из следующих видов звезд: красные гиганты, красные карлики, белые гиганты, белые карлики — принадлежат главной последовательности?

§ 33. СУДЬБЫ ЗВЕЗД

1. «Звезда-гостья» и «звезда Тихо Браге»
2. От газового облака до белого карлика
3. Эволюция звезд разной массы

Звездное небо издавна было символом вечного постоянства: на Земле менялась погода, сменялись времена года, одни государства исчезали, а другие появлялись, но звезды — одни и те же звезды — неизменно оставались на прежних местах.

Однако, как выяснилось, изменяются и звезды, причем эти изменения бывают порой весьма драматичными.

1. «ЗВЕЗДА-ГОСТЬЯ» И «ЗВЕЗДА ТИХО БРАГЕ»

Раз в несколько столетий на небе внезапно появляется новая, чрезвычайно яркая звезда.

В китайских и японских хрониках сохранились упоминания о «звезде-гостье», вспыхнувшей в созвездии Тельца в 1054 году. Новую звезду можно было видеть даже днем: она была ярче Венеры. Звезда украшала небо около трех недель, а затем постепенно угасала в течение года. Интересно, что в европейских хрониках упоминаний о ярчайшей «звезде-гостье» вообще нет! Видимо, средневековые европейские звездочеты готовы были скорее не поверить собственным глазам, чем усомниться в учении церкви о неизменности звездного свода.

Следующая вспышка яркой звезды произошла только в 1572 году. Ее сразу же заметил 26-летний датчанин Тихо Браге. Она произвела на него такое впечатление, что он решил посвятить жизнь изучению звезд. Браге стал великим астрономом, и результаты его наблюдений позволили другому великому астроному, Иоганну Кеплеру, открыть «законы Кеплера». А они, в свою очередь, помогли третьему великому ученому, Исааку Ньютону, открыть закон всемирного тяготения. Вот какую огромную роль сыграла в истории науки эта вспыхнувшая звезда, названная «звездой Тихо Браге».

С тех пор и до сегодняшнего дня только один-единственный раз — в 1604 году — на небе вспыхнула новая звезда, которую можно было видеть невооруженным глазом.

Но благодаря телескопам астрономы следующих веков узнали, что вспышки звезд происходят довольно часто. Они свидетельствуют о чудовищных взрывах звезд, которыми, однако, их жизнь не всегда заканчивается.

Расскажем о судьбах звезд подробнее.

2. ОТ ГАЗОВОГО ОБЛАКА ДО БЕЛОГО КАРЛИКА

Расскажем сначала о спокойных стадиях эволюции звезды.

НА ПУТИ К ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рождение всех звезд происходит примерно одинаково. Облако разреженного межзвездного газа под действием гравитации сжимается и *нагревается*. Когда температура в центре облака достигает нескольких миллионов градусов, начинаются *термоядерные реакции синтеза* — превращение водорода в гелий.

Это и есть рождение звезды: она начинает *светить*.

Выделение энергии при термоядерных реакциях значительно повышает температуру в центральной части звезды, и давление там настолько возрастает, что сжатие под действием тяготения прекращается. Звезда переходит в *стационарное* состояние, то есть состояние, в котором она пребывает длительное время. При этом сила давления раскаленного газа, непрерывно подогреваемого термоядерными реакциями, в точности уравнивает силу тяготения.

ПРЕБЫВАНИЕ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В стационарном состоянии звезда проводит «лучшую» часть своей жизни, измеряемую миллионами и даже миллиардами лет. При этом чем больше масса звезды, тем большее давление в ее центре, и, следовательно, необходима большая температура для уравнивания тяготения. Поэтому находящиеся в стационарном состоянии звезды большей массы имеют одновременно и большую температуру, и большую светимость. Значит, для таких звезд чем выше температура, тем выше светимость. А это как раз и есть главное свойство звезд главной последовательности (см. § 32. *Разнообразие звезд*).

Итак, мы приходим к выводу, что

звезды главной последовательности — это звезды, находящиеся в стационарном состоянии.

Теперь становится понятным, почему большинство известных звезд принадлежат главной последовательности — просто потому, что в стационарном состоянии звезды пребывают долго.

Как зависит время жизни звезды от ее массы?

Более массивные звезды «сгорают» быстрее, чем менее массивные, потому что, как мы видели, чем больше масса звезды, тем выше температура, необходимая для поддержания стационарного состояния звезды.

Жизнь белых и голубых гигантов в *тысячи раз* короче, чем жизнь нашего Солнца. Уже сам факт, что мы можем наблюдать такие молодые звезды *сегодня*, означает, что *процесс образования звезд продолжается*. «Сотворение мира» еще далеко не завершено!

Зато красные карлики, находящиеся в самом низу главной последовательности, живут значительно дольше звезд типа Солнца, так как они расходуют свою энергию куда экономнее. Вот уж поистине — «тише едешь — дальше будешь»: продолжительность жизни красных карликов сопоставима со временем существования Вселенной, которое мы оценим в § 35. *Происхождение и эволюция Вселенной*.

УХОД С ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

С главной последовательности — в красные гиганты

Когда в центральной области звезды весь имеющийся водород превратится в гелий, образуется *гелиевое ядро*. Но это еще не конец ядерных реакций, потому что гелий представляет собой тоже ядерное топливо: при температуре выше 15 миллионов градусов начинаются термоядерные реакции, при которых гелий превращается в углерод. А такие температуры возникают, когда масса гелиевого ядра становится достаточно большой, так как с увеличением массы увеличиваются гравитационные силы, сжимающие ядро звезды. А при еще более высоких температурах начинаются и другие термоядерные реакции.

«Включение» новых термоядерных реакций сопровождается новым выделением энергии и, следовательно, еще большим повышением температуры. Возросшее при этом давление побеждает гравитацию, и звезда вздувается. Наружные слои звезды отбрасываются на большое расстояние от ядра, а их температура резко падает. Звезда становится огромной и «холодной», то есть приобретает красный цвет — это и есть *красный гигант*. Примерно через 5—6 миллиардов лет стать красным гигантом суждено и нашему Солнцу.

Некоторые красные гиганты пульсируют, проходя стадию уже знакомых вам цефеид (см. § 32. *Разнообразие звезд*).

В состоянии красного гиганта звезда пребывает тоже сравнительно долго — этим и объясняется «населенность» области красных гигантов на диаграмме «температура — светимость».

Красный гигант превращается в белого карлика

Однако когда-то приходит конец *всем* возможным ядерным реакциям, так как они могут продолжаться только до тех пор, пока энергия *выделяется*. «Золой» термоядерных реакций явля-

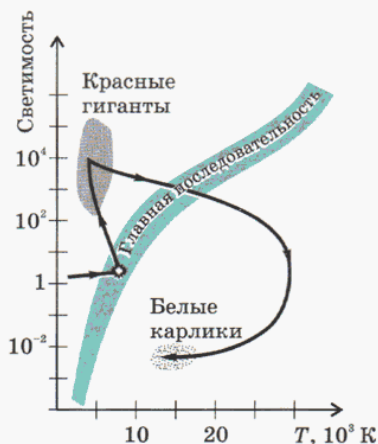
ется железо: так как энергия связи для ядер железа максимальна, при образовании из железа любых других элементов энергия уже не выделяется, а поглощается (см. § 26. Ядерные реакции и энергия связи ядер).

Внешние слои звезды, постепенно расширяясь, навсегда покидают ядро, и на месте звезды остается лишенное ядерных источников энергии, но раскаленное добела железное ядро диаметром порядка диаметра Земли. Это и есть *белый карлик*.

Эволюция звезды на диаграмме «температура — светимость»

Если изобразить траекторию эволюции звезды — от газового облака до белого карлика — на диаграмме «температура — светимость», мы получим кривую, показанную на рис. 33.1.

Рис. 33.1. Эволюционная траектория звезды на диаграмме «температура — светимость»: звезда, рождаясь, выходит на главную последовательность, долго пребывает на ней, затем становится красным гигантом и, наконец, белым карликом



Дальнейшая судьба звезды определяется ее массой.

3. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД РАЗНОЙ МАССЫ

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ С МАССОЙ, ПРИМЕРНО РАВНОЙ МАССЕ СОЛНЦА

Звезды с массой, не намного отличающейся от массы Солнца (а таких звезд — большинство), заканчивают свою жизнь сравнительно «мирно» — без взрывов.

Образовавшийся из них белый карлик постепенно остывает, становясь в конце концов невидимой звездой. Но это происходит чрезвычайно медленно, так как из-за очень малой поверхности белый карлик излучает энергию очень медленно. К тому же его остывание несколько «притормаживается» гравитационным

сжатием, которое продолжает «подогревать» белый карлик. Длительность пребывания звезды в стадии белого карлика и объясняет «населенность» этой области на диаграмме «температура — светимость».

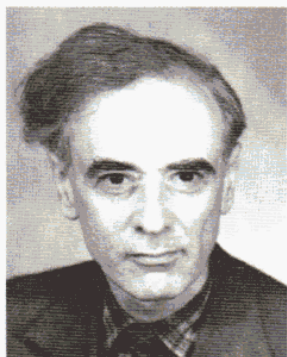
Картина неизбежного остывания белого карлика кажется довольно грустной, но, оказывается, это не всегда конец жизни звезды. Если вблизи белого карлика есть другая звезда, у него может начаться новая жизнь с гигантскими «фейерверками». Об этом мы расскажем ниже.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ С МАССОЙ, БОЛЬШЕЙ МАССЫ СОЛНЦА

Нейтронные звезды

Если масса ядра звезды превышает массу Солнца более чем в полтора раза, колоссальная сила тяготения «вдавит» электроны в протоны, в результате чего образуются нейтроны.

При этом возникнет *нейтронная звезда*, то есть звезда, состоящая в основном из нейтронов, — как бы гигантских размеров атомное ядро. Масса такой звезды сопоставима с массой Солнца, а диаметр составляет всего *несколько километров!*



Лев Давидович Ландау
(1908—1968)

Плотность нейтронной звезды близка к плотности атомного ядра и во много раз превышает плотность белых карликов: масса наперстка вещества нейтронной звезды равна массе нескольких груженых товарных вагонов.

Модели образования нейтронных звезд разработали советский физик лауреат Нобелевской премии Лев Давидович Ландау и американский физик Роберт Оппенгеймер.

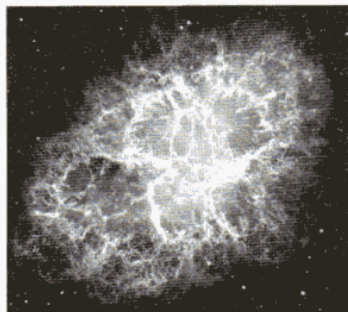
Взрывы сверхновых

При образовании нейтронной звезды гравитационное сжатие ее ядра происходит за доли секунды. Затем наружные слои, содержащие еще много водорода, стремительно падают к центру. При ударе о ядро они «взрываются», так как в этих слоях резко повышается температура и начинают бурно протекать термоядерные реакции. За краткое время выделяется колоссальное количество энергии — светимость звезды возрастает в *миллиарды раз*.

Это — так называемая вспышка *сверхновой*. При этом значительная часть звезды, а иногда и вся звезда, разлетается.

Именно взрывами сверхновых и были наблюдавшиеся с Земли три вспышки звезд, хорошо видимые невооруженным глазом — в 1054, 1572 и 1604 годах. Следы этих взрывов сохранились и сегодня (рис. 33.2, а также фото на форзаце).

Рис. 33.2. В тех местах небосвода, где произошли вспышки сверхновых, с помощью телескопа можно увидеть гигантские облака вещества, выброшенного при взрывах. Наиболее значительное такое облако — знаменитая Крабовидная туманность, представляющая собой след взрыва сверхновой 1054 года



Происхождение химических элементов

При взрыве сверхновой температура исчисляется *миллиардами градусов*. При такой огромной температуре протекают даже такие ядерные реакции, при которых происходит поглощение энергии, в результате чего «выпекаются» ядра элементов периодической таблицы Менделеева вплоть до урана. И после взрыва эти ядра тяжелых элементов попадают в облако межзвездного газа.

Но гибель одних звезд — это возможность рождения новых! И они рождаются теперь из облака, *обогащенного тяжелыми элементами*. Их называют звездами второго поколения. Если какой-либо из них «посчастливится» в свою очередь стать сверхновой, то при ее взрыве «выпечется» очередная порция тяжелых элементов, которые войдут в состав звезд третьего поколения, — и так в каждом следующем поколении звезд доля тяжелых элементов будет увеличиваться.

Наше Солнце является звездой второго, а может быть, и третьего поколения. Вот почему в Солнечной системе «хватило» тяжелых элементов для образования планет земной группы, на одной из которых смогла зародиться жизнь. «Заплачено» за это, как мы видим, «жизнью» звезд: взрываясь, они «выпекали» химические элементы, из которых мы состоим.

Этот чрезвычайно долгий путь к возникновению жизни объясняет, почему жизнь так редка во Вселенной: мы до сих пор не нашли нигде ни братьев по разуму, ни вообще каких-либо следов жизни — нигде, кроме нашей Земли. И эта уникальность жизни на Земле делает бесконечной нашу ответственность за ее сохранение.

Черные дыры

Если масса звезды значительно превышает массу Солнца, гравитационное сжатие ее ядра не останавливается даже при достижении плотности нейтронной звезды. Сила тяготения при этом становится настолько огромной, что ничто не может покинуть звезду — даже *свет*, то есть звезда становится *невидимой*.

Это — так называемая *черная дыра*.

Теория тяготения, с помощью которой можно исследовать свойства черных дыр, появилась в начале 20-го века. Она называется *общей теорией относительности*. Создал ее Альберт Эйнштейн, с именем которого мы многократно встречались в нашем курсе.

Большой вклад в развитие теории черных дыр внесли английский физик Стивен Хокинг и советский физик Яков Борисович Зельдович. Согласно современным представлениям в нашей Галактике порядка ста миллионов черных дыр, являющихся остатками наиболее массивных звезд. А в центре Галактики, видимо, есть черная дыра с массой в несколько миллионов масс Солнца. И хотя она непрерывно поглощает звезды, «пищи» ей хватит еще на миллиарды лет.

ЭВОЛЮЦИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Двойные звезды

Многие звезды образуют систему *двойных* звезд, обращающихся вокруг общего центра масс.

Иногда видны обе звезды из пары, но часто о существовании второй звезды догадываются по косвенным признакам.

Например, в середине 19-го века немецкий астроном Фридрих Бессель обнаружил, что Сириус совершает еле заметное волнообразное движение. Это можно было объяснить только вращением Сириуса и какой-то другой звезды вокруг общего центра масс. Но чтобы заставить массивный Сириус совершать такое движение, вторая звезда также должна быть массивной и поэтому достаточно яркой, однако никакой звезды вблизи Сириуса долгое время не удавалось увидеть даже в телескоп. Когда же ее, наконец, обнаружили, выяснилось, что это еле-еле заметная звездочка. Как вы уже, наверное, догадались, спутник Сириуса оказался *белым карликом*.

Другим указанием на «двойственность» звезды может быть, как мы уже говорили, периодическое изменение ее яркости. Например, блеск яркой звезды Алголь каждые 69 часов на короткое время уменьшается более чем вдвое, а затем так же быстро возрастает до прежнего значения. Такое «подмигивание» звезды вызывало тревогу, которая отразилась даже в ее арабском названии: «алголь» означает «голова демона».

Загадку Алголя разгадал английский астроном Джон Гудрайк¹: вокруг Алголя обращается более слабая звезда, которая периодически заслоняет часть Алголя от земного наблюдателя.

Новые

Если одна из звезд, составляющих пару двойных, уже стала белым карликом, а вторая еще находится в стационарном состоянии, белый карлик может начать «перетягивать» на себя звездное вещество второй звезды — в основном водород, являющийся замечательным термоядерным «горючим».

На слой водорода, осевшего на маленьком, но чрезвычайно массивном белом карлике, действует огромная сила тяготения. Она сжимает водород, который, нагревшись до температуры термоядерного «возгорания», вспыхивает весь сразу. Это — так называемый взрыв *новой*.

При взрыве новой мощность излучения намного меньше, чем при взрыве сверхновой, так как при взрыве новой взрывается не вся звезда, а только ее шарообразный слой. Кроме того, каждая сверхновая взрывается только однажды — это гибель звезды, а *новые* могут взрываться *множественно* с периодом от нескольких десятков до нескольких тысяч лет.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как происходит рождение звезды?
2. Чем характеризуется стационарное состояние звезды?
3. Где на диаграмме «температура — светимость» находятся звезды, пребывающие в стационарном состоянии?
4. Как зависит время жизни звезды от ее массы?
5. Как образуются красные гиганты?
6. Как образуются белые карлики? Из ядер какого элемента они в основном состоят?
7. Опишите основные этапы эволюции звезды с массой, примерно равной массе Солнца.
- 8*. Как появляются нейтронные звезды? Что они собой представляют?
- 9*. По какой причине происходит взрыв сверхновой?
- 10*. Как попадают в межзвездную среду ядра тяжелых элементов?
- 11*. Что такое черные дыры?
- 12*. Что такое двойные звезды? Из-за чего происходит взрыв новой?

¹ Когда Джон Гудрайк сделал это открытие, ему было 18 лет. Он прожил всего 22 года и к тому же был глухонемым!

§ 34. ГАЛАКТИКИ

1. Наша Галактика — Млечный Путь
2. Другие галактики

Мы расскажем здесь о размерах и строении нашей звездной системы, которая носит имя Галактика, или Млечный Путь.

Вы узнаете также о других галактиках, скоплениях галактик и квазарах — удивительных космических объектах, мощность излучения которых больше, чем у целых галактик.

1. НАША ГАЛАКТИКА — МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

В ясную безлунную ночь, особенно вдали от города, хорошо заметна мягкая светящаяся полоса, опоясывающая все небо. Это — Млечный Путь¹ (рис. 34.1).

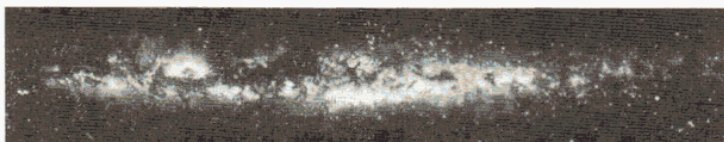


Рис. 34.1. Полная фотографическая карта Млечного Пути, опоясывающего небо (составлена из нескольких фрагментов)

Древних астрономов удивляло, что эта светящаяся туманность никогда не меняет ни своей формы, ни положения на небесном своде — ведь такое постоянство свойственно только звездам.

Загадку Млечного Пути разгадал Галилео Галилей, направив на него построенный им телескоп: оказалось, что это — колоссальное скопление звезд (рис. 34.2). И тогда стало понятно, почему форма и положение этой «туманности» остаются неизменными.

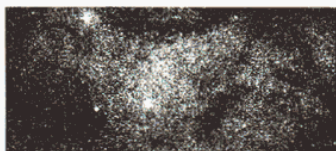


Рис. 34.2. Участок Млечного Пути, видимый в телескоп

Расстояния между звездами в этом скоплении звезд в миллионы раз больше размеров самих звезд.

¹ Согласно одному из древнегреческих мифов эта светящаяся полоса — след пролитого молока.

Следующий шаг к разгадке Млечного Пути сделал английский астроном Уильям Гершель во второй половине 18-го века. Изучив расположение звезд на различных участках неба, он пришел к выводу, что Солнце принадлежит огромному звездному скоплению, имеющему форму диска. Когда мы смотрим вдоль плоскости этого диска, то видим густо заполненное звездами небо — это и есть Млечный Путь. А когда мы смотрим перпендикулярно плоскости диска, мы, естественно, видим меньше звезд.

Дальнейшие астрономические исследования подтвердили предположение Гершеля: оказалось, что Солнце принадлежит огромной звездной системе, имеющей форму двояковыпуклой линзы. Эта звездная система была названа Галактикой¹.

РАЗМЕРЫ И СТРУКТУРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

В Галактике, по разным оценкам, находится от 100 миллиардов до одного триллиона (10^{12}) звезд. Диаметр Галактики около 100 000 световых лет, причем Солнце находится на расстоянии примерно 30 тысяч световых лет от центра Галактики.

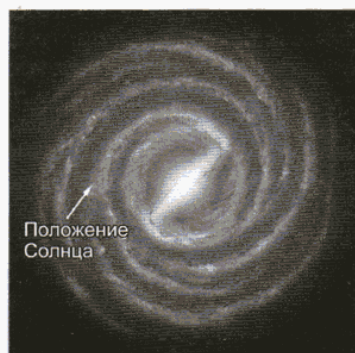
На рисунках 34.3 и 34.4 схематически изображено, какой виделась бы наша Галактика наблюдателю из другой галактики.

Рис. 34.3. Вид Галактики «сбоку». Светлые кружки — шаровые скопления, содержащие до миллиона звезд каждое



Рис. 34.4. Вид Галактики «сверху»

Галактика имеет четыре спиральные ветви, а в ее центре есть ядро, где звезды расположены в тысячи раз гуще, чем в «нашей» части Галактики. Предполагают, что в центре ядра Галактики находится огромная черная дыра массой в несколько миллионов солнечных масс.



¹ От греческого «галаксиас» — молочный.

Мы не видим с Земли центральной области Галактики, потому что она скрыта от нас гигантскими облаками межзвездной пыли, представляющими непреодолимое препятствие для видимого света. Однако астрономам удалось все-таки разглядеть ядро Галактики с помощью инфракрасных лучей, для которых межзвездная пыль прозрачна.

Все звезды Галактики вращаются вокруг ее центра, «повинуясь» силам всемирного тяготения. Так, Солнце совершает один оборот вокруг центра Галактики примерно за 200 миллионов лет, двигаясь со скоростью около 250 км/с (относительно центра Галактики).

Проведем сравнение

Чтобы представить себе, насколько неравномерно распределено вещество в Галактике, выберем масштаб, при котором Солнце было бы с булавочную головку — это масштаб, при котором 1 световой год соответствует 10 км. Расстояния между звездами — «булавочными головками» — в нашей области Галактики исчислялись бы тогда десятками и сотнями километров (например, ближайшая к нам звезда находилась бы на расстоянии сорока с лишним километров).

Вся же Галактика даже при таком огромном уменьшении осталась бы огромной: ее диаметр был бы равен миллиону километров, то есть почти в три раза больше настоящего расстояния от Земли до Луны!

2. ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

ГАЛАКТИКА АНДРОМЕДЫ

На ночном небе северного полушария можно увидеть невооруженным глазом крошечное туманное пятнышко в созвездии Андромеды, которое назвали туманностью Андромеды. При наблюдении в телескоп можно заметить очень интересную структуру этой туманности (рис. 34.5 и фото на форзаце).

В середине 18-го века немецкий ученый Иммануил Кант предположил, что туманность Андромеды — это очень далекая огромная звездная система, подобная нашей.



Рис. 34.5. Так выглядит галактика Андромеды в телескоп

Отдельные звезды — это попавшие в поле зрения звезды нашей Галактики, находящиеся во много раз ближе к нам, чем галактика Андромеды.

Предположение Канта подтвердилось в начале 20-го века, когда американский астроном Эдвин Хаббл с помощью нового мощного телескопа смог различить отдельные звезды по краям туманности Андромеды.

Согласно современным представлениям туманность Андромеды — это такая же гигантская звездная система, как и наша Галактика, даже несколько больше. Ее назвали галактикой Андромеды. От нашей Галактики до галактики Андромеды около 2 миллионов световых лет.

С открытия галактики Андромеды началась эра «галактической астрономии»: в 20-м веке астрономы открыли, что существуют *миллиарды* галактик. В отличие от всех других название нашей галактики пишут с большой буквы: «Галактика». За ней сохранилось и название Млечный Путь.

ТИПЫ ГАЛАКТИК

В 1923 году Хаббл заметил, что все галактики по форме можно разделить на три типа: *спиральные, эллиптические и неправильные* (рис. 34.6).

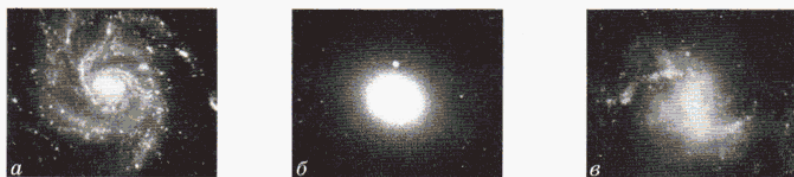


Рис. 34.6. Типы галактик: *а* — спиральная;
б — эллиптическая; *в* — неправильная

Спиральные галактики, к числу которых принадлежат наша Галактика и галактика Андромеды, составляют около 70 % всех галактик. Эллиптических галактик примерно 25 %, а неправильных — не более 5 %.

Как выяснилось впоследствии, галактики разных типов отличаются также по составу звезд.

В спиральных галактиках много молодых звезд, в том числе белых и голубых гигантов. Причем в ветвях этих галактик много межзвездного газа, являющегося звездным строительным материалом, то есть в спиральных галактиках процесс образования звезд продолжается. Идет он и в неправильных галактиках.

А вот эллиптические галактики состоят в основном из старых красноватых звезд, и в них практически нет межзвездного газа, то есть в этих галактиках звезды уже не рождаются.

ГРУППЫ И СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Галактики притягиваются друг к другу силами тяготения, объединяясь в *группы галактик*, а группы объединяются в *скопления* галактик. У нашей Галактики есть два спутника, небольшие галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака (их обнаружил один из спутников Магеллана; они видны только в Южном полушарии). Есть спутники и у галактики Андромеды.

Наша Галактика и галактика Андромеды, в свою очередь, входят в так называемую Местную группу галактик, содержащую несколько десятков галактик. А Местная группа — всего лишь «маленькое» уплотнение недалеке от края Местного сверхскопления галактик диаметром около 100 миллионов световых лет.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

Когда астрономы освоились с галактическими и межгалактическими масштабами, они решили выяснить, как распределены галактики во Вселенной. На рис. 34.7 приведена составленная из тысяч отдельных фрагментов карта распределения галактик, видимых в современные телескопы.

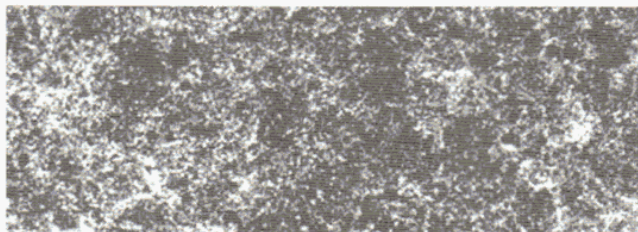


Рис. 34.7. Крупномасштабная структура Вселенной

Как мы видим, распределение галактик имеет *ячеистую структуру*, сходную со структурой пористого тела. Размеры гигантских ячеек этой структуры составляют сотни миллионов световых лет.

КВАЗАРЫ

Во второй половине 20-го века появились телескопы, с помощью которых астрономы смогли заглянуть на расстояния в *миллиарды световых лет*. И там они обнаружили источники излучения, подобных которым в близкой к нам части Вселенной вообще нет!

Их называли *квазарами* (от английского *quasi-stellar*, что означает «звездopodobный»), так как долгое время квазары принимали за очень далекие звезды. Когда же выяснилось, что расстояния

до квазаров исчисляются *миллиардами* световых лет¹, стало ясно, что они не могут быть «просто звездами», так как на таких расстояниях даже самые яркие звезды не видны в лучшие телескопы. Если квазар виден на таком расстоянии, мощность его излучения в десятки и даже сотни раз превосходит мощность излучения *целой галактики*. Итак, самые мощные источники энергии во Вселенной — это квазары.

Еще более интригующее свойство квазаров состоит в том, что их сверхгалактическая мощность излучения исходит из чрезвычайно малой (по галактическим меркам) области пространства — размеры квазаров порядка размеров Солнечной системы! Этот вывод ученые сделали из того, что яркость квазара может заметно изменяться всего за несколько дней, а при «галактических» размерах это невозможно (напомним, что размеры галактик исчисляются сотнями тысяч световых лет).

Фантастическую мощность излучения квазаров при их сравнительно небольшом объеме не может обеспечить даже термоядерный синтез. Ученые предположили, что источник энергии квазара — гравитационное поле колоссальной черной дыры в ядре галактики. Своим чудовищным притяжением эта черная дыра каждую секунду разрывает миллионы звезд. При этом образуется диск из вещества, которое, быстро вращаясь и сжимаясь, излучает огромное количество энергии.

Может быть, квазары — это «портреты галактик в молодости». Ведь свет от наиболее удаленных квазаров идет к нам около 10 миллиардов лет, а это близко к возрасту Вселенной: как мы скоро увидим, она образовалась примерно 13 миллиардов лет назад (см. § 35. *Происхождение и эволюция Вселенной*).

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что представляет собой Млечный Путь?
2. Каковы размеры и форма Галактики?
3. Каково положение Солнца в Галактике?
4. Сколько примерно звезд в Галактике?
5. Можно ли увидеть с Земли ядро Галактики?
6. Как движется Солнце относительно центра Галактики?
7. Что вы знаете о галактике Андромеды?
- 8*. Какие типы галактик вам известны? К какому из них принадлежит наша Галактика?
- 9*. Опишите скопления и сверхскопления галактик.
- 10*. Какова крупномасштабная структура Вселенной?
- 11*. Каковы основные свойства квазаров?

¹ В следующем параграфе мы расскажем, как удалось их измерить.

§ 35. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

1. Расширение Вселенной
2. Большой взрыв
3. Будущее Вселенной

Разделы астрофизики и астрономии, изучающие происхождение и эволюцию Вселенной, объединены под названием «космология», то есть наука о космосе.

В этом параграфе мы рассмотрим некоторые космологические модели и подтверждающие их наблюдения.

1. РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

Ученым удалось измерить скорости, с которыми звезды и даже далекие галактики приближаются к нам или удаляются от нас. Помогли ученым спектры излучения звезд — а точнее, *отличия* в спектрах разных звезд.

Как вы уже знаете, атомы каждого вещества характеризуются своим индивидуальным спектром, состоящим из отдельных линий (см. § 21. *Атомные спектры*). Оказывается, однако, что, если источник света удаляется от наблюдателя или приближается к нему, линии в спектре смещаются — к красному концу спектра, если источник света удаляется, и к фиолетовому концу спектра — если источник приближается.

Смещение линий спектра при движении источника света — явление так называемого эффекта Доплера, который имеет место при распространении любых волн — как звуковых, так и световых¹. Приведем известный пример этого эффекта: когда мимо вас на большой скорости проезжает автомобиль, тон издаваемого им звука (мотора или гудка) выше, когда автомобиль приближается, и ниже, когда он удаляется.

Таким образом, по величине смещения линий в спектре звезды можно определить, с какой скоростью удаляется или приближается эта звезда.

Как выяснилось, некоторые звезды приближаются к нам, а некоторые — удаляются.

Но, когда в начале 20-го века таким же образом измерили скорости галактик, оказалось, что практически *все* галактики *удаля-*

¹ Этот эффект был открыт в 19-м веке австрийским физиком Кристианом Доплером.

ются от нас: в их спектрах линии излучения смещены к *красному* концу. Исключение составили только ближайшие галактики (в том числе галактика Андромеды).

ЗАКОН ХАББЛА

Уже известный вам американский астроном Эдвин Хаббл решил выяснить: связана ли скорость удаления галактики с расстоянием до нее? И, проанализировав данные наблюдений, он обнаружил, что чем дальше находится галактика, тем быстрее она удаляется, причем

скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее.

Это соотношение между скоростью v удаления галактики и расстоянием r до нее получило название *закона Хаббла*. Его записывают обычно в виде $v = Hr$.

Коэффициент пропорциональности H назвали *постоянной Хаббла*. Из ее определения следует, что эта постоянная имеет размерность $\left[\frac{1}{\text{время}} \right]$. Из астрономических наблюдений следует, что

$$H \approx \frac{1}{13 \text{ миллиардов лет}}.$$

Что же означает этот стоящий в знаменателе огромный промежуток времени? Чтобы ответить на этот вопрос, запишем закон Хаббла в виде $r = vT$, где $T = \frac{1}{H} \approx 13$ миллиардов лет.

Формула $r = vT$ описывает *равномерное движение*, то есть движение с постоянной скоростью: удаляясь с постоянной скоростью v , галактика за время T удалилась от нас на расстояние r .

РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Итак, из закона Хаббла следует удивительный вывод: примерно 13 миллиардов лет назад все галактики начали разбегаться от нас! И сразу возникает вопрос: почему все галактики разбегаются именно *от нас*? Значит ли это, что мы находимся в центре Вселенной?

Увы, честолюбивая надежда человека на центральное место во Вселенной в очередной раз не оправдалась!

Чтобы понять, почему это так, представьте галактики точками, нарисованными на огромном резиновом листе, который равномерно растягивают во все стороны. При этом расстояния между *любыми точками* на поверхности резинового листа каждую минуту увеличиваются *в одно и то же число раз*.

А отсюда следует, что наблюдателю, живущему в *любой* галактике *расширяющейся Вселенной*, будет казаться, что все галактики разбегаются именно *от него!* Итак, наблюдаемое разбегание галактик означает просто, что *Вселенная расширяется*.

Как определили расстояния до квазаров?

Расстояния до квазаров измерили по огромному красному смещению линий в их спектрах. Это смещение было настолько велико, что поначалу исследователи не смогли даже опознать хорошо знакомые им линии — например, линии водорода. А когда их все-таки распознали, выяснилось, что такое огромное смещение соответствует, согласно закону Хаббла, колоссальной скорости удаления: некоторые квазары удаляются от нас со скоростями, сравнимыми со скоростью света!

Зная скорость удаления квазара, можно с помощью закона Хаббла оценить и расстояние до него — причем сразу в световых годах. Например, если квазар удаляется со скоростью $v = 240\,000 \text{ км/с} = 0,8c$, где c — скорость света, получаем согласно формуле $r = vT$, где $T \approx 13$ миллиардов лет, что этот квазар находится от нас на расстоянии примерно *10 миллиардов* световых лет.

2. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

МОДЕЛЬ ФРИДМАНА

Разбегание галактик, обнаруженное Хабблом в 1929 году, теоретически предсказал еще в 1922 году советский ученый Александр Александрович Фридман¹. Анализируя уравнения общей теории относительности Эйнштейна, Фридман доказал, что Вселенная не может оставаться стационарной: она должна либо расширяться, либо сжиматься. Фридман выбрал первую возможность и построил модель расширяющейся Вселенной.

Обнаруженное Хабблом разбегание галактик явилось подтверждением модели Фридмана.

Каков возраст Вселенной?

Модель Фридмана в сочетании с законом Хаббла утверждает, что у Вселенной было начало: примерно *13 миллиардов лет назад* все галактики начали разбегаться из одной точки.

Но что же происходило тогда в этой точке: *как* родилась Вселенная?

¹ А. А. Фридман был не только выдающимся математиком и физиком, но и замечательным летчиком, а также известным метеорологом. Незадолго до смерти он поднялся на азвостате на рекордную для того времени высоту 7400 метров.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ И ГОРЯЧАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Известный физик Джордж (Георгий Антонович) Гамов¹ узнал о модели расширяющейся Вселенной от самого Фридмана: Гамов был его учеником. Узнав впоследствии об открытом Хабблом разбегании галактик, Гамов предположил, что начало Вселенной напоминало колоссальный взрыв, который назвали *Большим взрывом*.

Совместно с сотрудниками Гамов в 1948 году предложил модель *горячей Вселенной*. Согласно этой модели на начальных стадиях Вселенной вещество имело не только колоссальную плотность, но и чрезвычайно высокую *температуру*.



Джордж
(Георгий Антонович)
Гамов
(1904—1968)



Александр
Александрович
Фридман
(1888—1925)



Эдвин Хаббл
(1889—1953)

Реликтовое излучение

Из модели горячей Вселенной следовало, что и сегодня должно существовать пронизывающее всю Вселенную излучение, порожденное 13 миллиардов лет назад — еще в ту раннюю пору, когда температура Вселенной была столь высока, что электромагнитное излучение преобладало над веществом. Это излучение называли *реликтовым*, то есть сохранившимся от древних эпох (вот уж поистине древних!).

Расширяясь вместе со Вселенной, это излучение постепенно остывало и, по оценке Гамова, должно было бы сегодня иметь температуру всего в несколько кельвинов.

И в 1964 году такое излучение с температурой чуть ниже 3 К действительно было обнаружено.

¹ Джорджа (Георгия Антоновича) Гамова трудно «приписать» к какой-либо одной стране. Он родился в Одессе, учился и работал в Ленинграде, затем некоторое время работал в различных европейских странах, а с 1934 года жил и работал в США.

Открытие реликтового излучения стало триумфом модели горячей Вселенной, и с тех пор она стала общепринятой. Однако последующее развитие физики, астрофизики и астрономии вносило в нее все новые уточнения.

Сценарий Большого взрыва

Согласно современным представлениям в первые моменты после Большого взрыва главными были сильные взаимодействия, благодаря которым возникли ядра водорода и гелия. Затем на сцену выступили слабые взаимодействия и начали рождаться электроны, позитроны и нейтрино. Это происходило до тех пор, пока температура не упала до нескольких миллиардов градусов.

Следующую фазу расширения называют фотонной эрой, потому что она характеризуется преобладанием излучения над веществом. Она длилась около миллиона лет и закончилась, когда температура упала до трех тысяч градусов: при такой температуре электроны и ядра начали образовывать атомы, вещество стало нейтральным и поэтому прозрачным для электромагнитного излучения. Получив свободу и постепенно расширяясь, оно охлаждалось и стало тем самым реликтовым излучением, которое сохранилось до наших дней.

Начало формирования галактик

Когда Вселенная просуществовала один или два миллиарда лет, главным фактором стала гравитация: под действием сил тяготения из облаков водорода и гелия начали формироваться зародыши галактик, а затем в них — зародыши звезд. Когда вещество в их центральной части нагрелось вследствие сжатия до миллионов градусов, начались термоядерные реакции.

3. БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ

Говоря о предполагаемом будущем Вселенной, мы имеем в виду события, которые могут произойти через *миллиарды* лет.

Оказалось, что будущее Вселенной зависит от *средней плотности материи* в ней. Если эта плотность меньше критической, равной, согласно космологическим моделям, примерно 10^{-26} кг/м³, то силы тяготения не смогут остановить процесс расширения Вселенной, и она будет неограниченно расширяться. Это — модель открытой Вселенной.

Если же средняя плотность материи во Вселенной больше критической, силы тяготения через какое-то время остановят расширение Вселенной, а затем заставят вещество сжиматься —

и снова в точку. А затем, может быть, произойдет новый (или *очередной?*) Большой взрыв. Это модель замкнутой Вселенной.

Согласно астрономическим наблюдениям плотность вещества во Вселенной в десять или даже в сто раз ниже критической, что как будто свидетельствует в пользу открытой Вселенной, которая должна неограниченно расширяться. Однако есть веские указания на существование «темной» или «невидимой» материи, масса которой может во много раз превышать массу звезд. Если учесть массу этой материи, средняя плотность Вселенной может оказаться близкой к критической.

От Большого взрыва до Человека

Развитие физики и астрономии лишило человека надежды на центральное место во Вселенной. Выяснилось, что наша Земля — всего лишь одна из нескольких планет, кружащихся вокруг одной из бесчисленных звезд, входящих в состав одной из бесчисленных галактик...

Однако живущий на «заурядной» планете человек смог заглянуть в невероятные глубины космоса и разгадать загадку происхождения Вселенной.

Вот уж поистине: не место красит человека, а человек — место. Земля может гордиться своими обитателями!

Как прекрасны законы природы, благодаря которым из хаоса Большого взрыва за миллиарды лет возникла такая сложная структура как *человеческий мозг*! И даже еще более сложная — *человеческая душа*...



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое красное смещение?
2. Как формулируется закон Хаббла? Какие выводы можно сделать из этого закона?
3. Выполняется ли закон Хаббла только для нас или он справедлив для возможных жителей любой галактики?
4. В чем состоит основной вывод Фридмана?
5. Как оценить возраст Вселенной? Чему он примерно равен?
6. Что такое Большой взрыв?
7. В чем состоит основное положение модели горячей Вселенной?
8. Какое вы знаете подтверждение модели горячей Вселенной?
9. Опишите основные этапы эволюции Вселенной согласно современным представлениям.



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Расстояния до ближайших звезд** измеряются световыми годами.
- **Светимостью звезды** называют мощность ее излучения. За единицу светимости принимают светимость Солнца.
- Большинство звезд принадлежат **главной последовательности** на диаграмме «температура — светимость». Кроме того, существует много **красных гигантов** — огромных звезд с низкой температурой поверхности и **белых карликов** — очень малых звезд с высокой температурой поверхности.
- **Эволюция звезды с массой, близкой к массе Солнца:** облако разреженного межзвездного газа $\Rightarrow$ звезда на главной последовательности $\Rightarrow$ красный гигант $\Rightarrow$ белый карлик.
- **Эволюция звезды с массой, намного большей массы Солнца:** облако разреженного межзвездного газа $\Rightarrow$ белый или голубой гигант на главной последовательности $\Rightarrow$ красный гигант $\Rightarrow$ вспышка сверхновой $\Rightarrow$ нейтронная звезда или черная дыра.
- **Диаметр нашей Галактики**, по современным представлениям, около 100 000 световых лет. Она содержит от 100 миллиардов до триллиона звезд. В ядре Галактики, видимо, находится массивная черная дыра.
- **Ближайшие к нам другие галактики:** Большое и Малое Магеллановы Облака и галактика Андромеды. **Галактики** образуют группы, скопления и сверхскопления.
- **Закон Хаббла:** $v = Hr$, где v — скорость удаления галактики, r — расстояние до галактики. Постоянная Хаббла $H \approx \frac{1}{13 \text{ миллиардов лет}}$. Из закона Хаббла следует, что Вселенная расширяется из одной точки, причем расширение началось примерно 13 миллиардов лет назад.
- **Модель расширяющейся Вселенной** была предложена советским ученым А. А. Фридманом.
- Согласно **модели горячей Вселенной**, предложенной Г. А. Гамовым, на начальных стадиях вещество во Вселенной имело колоссальную плотность и чрезвычайно высокую температуру. Подтверждением модели горячей Вселенной является обнаруженное **реликтовое излучение** с температурой немного ниже 3 К.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: экспериментально определить ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление r источника тока.

Оборудование: источник постоянного тока, амперметр, вольтметр, реостат, ключ, соединительные провода.

Описание работы

Измерив силу тока в цепи и напряжение на клеммах источника при двух различных значениях внешнего сопротивления и записав в обоих случаях закон Ома для полной цепи, получим $\mathcal{E} = U_1 + I_1 r$, $\mathcal{E} = U_2 + I_2 r$, где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника, r — внутреннее сопротивление источника, I_1 , U_1 — значения силы тока и напряжения при одном внешнем сопротивлении цепи, а I_2 , U_2 — при другом.

Написанные соотношения являются системой двух линейных уравнений с двумя неизвестными $\mathcal{E}$ и r . Решая эту систему, полу-

чим $\mathcal{E} = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2}$, $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$.

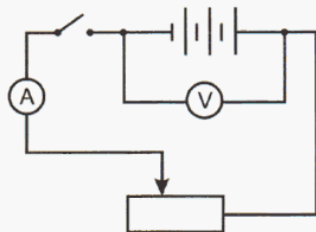
Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по изображенной на рисунке схеме.

2. Установите ползунок реостата примерно в среднее положение, измерьте силу тока I_1 и напряжение U_1 .

3. Передвинув ползунок реостата, измерьте I_2 и U_2 .

4. По приведенным выше формулам вычислите r и $\mathcal{E}$.



¹ В состав комплекта «Физика—11» входит тетрадь для лабораторных работ, использование которой сократит время на оформление работы. В тетради приведены также методы расчета погрешностей.

5. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведен образец этой таблицы.

I_1, A	I_2, A	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$r, \text{Ом}$	$\mathcal{E}, \text{В}$

6. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

2. НАБЛЮДЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Цель работы: исследовать поведение проводника с током в магнитном поле.

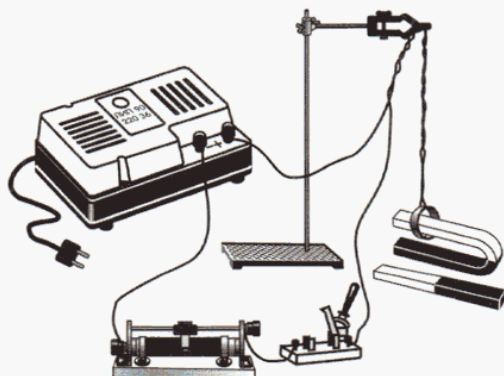
Оборудование: источник постоянного тока, дугообразный магнит, штатив с лапкой, катушка-моток, полосовой магнит, реостат, ключ, соединительные провода.

Описание работы

Требуется определить (качественно), как зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, от значения магнитной индукции, силы тока в проводнике и длины проводника.

Ход работы

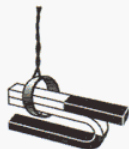
1. Подвесьте проволочную катушку к лапке штатива, чтобы она не касалась вставленного в нее полюса дугообразного магнита, расположенного на столе. Концы катушки подключите через реостат и ключ к источнику постоянного тока (см. рисунок). Реостат установите на максимальное сопротивление.



2. Замкните цепь на несколько секунд и заметьте, насколько отклонится катушка от первоначального положения.

3. Изменяя положение ползунка реостата, повторите опыт 2—3 раза при различной силе тока. Выясните, как зависит сила, действующая на катушку с током, от силы тока в катушке.

4. Не меняя силы тока, сравните углы отклонения катушки от первоначального положения при одном, а затем при двух магнитах (дугообразном и полосовом), сложенных вместе одноименными полюсами, как показано на рисунке.



Выясните, как зависит сила, действующая на катушку с током, от значения магнитной индукции.

5. Поднесите дугообразный магнит к катушке с током, а затем к гибкому проводу, например идущему от катушки к ключу, и сравните их отклонения от первоначального положения. Выясните, как зависит сила, действующая на проводник с током, от длины проводника.

6. Запишите в тетради для лабораторных работ: что вы наблюдали и какие сделали выводы.

3. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Цели работы: 1) определить на опыте, от чего зависят сила и направление индукционного тока в катушке; 2) познакомиться с принципом действия трансформатора.

Оборудование: миллиамперметр¹, проволочная катушка, дугообразный и полосовой магниты, источник тока, школьный трансформатор, реостат, ключ, соединительные провода.

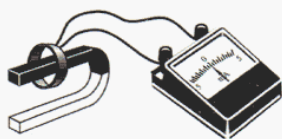
Описание работы

Индукционный ток в замкнутом контуре возникает при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. В данной работе магнитный поток изменяют следующими способами:

1) *изменяя во времени* магнитное поле, в котором находится *неподвижный* контур — например, вдвигая магнит в катушку или выдвигая его из катушки;

2) *перемещая* этот контур (или его части) в *постоянном* магнитном поле (например, надевая катушку на магнит).

¹ Нулевое деление миллиамперметра должно находиться посередине шкалы.



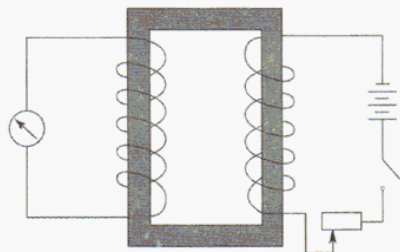
Ход работы

1. Одну из катушек без сердечника подключите к зажимам миллиамперметра. Надевайте и снимайте катушку с северного полюса дугообразного магнита с различной скоростью.

Для каждого случая замечайте максимальное значение силы индукционного тока и его направление (по отклонению стрелки миллиамперметра). Запишите вывод.

2. Переверните магнит и наденьте катушку на его южный полюс, а затем снимите её. Повторите опыт, увеличив скорость катушки. Обратите внимание на показания миллиамперметра, в частности, на направление отклонения стрелки прибора. Запишите выводы.

3. Сложите два магнита (полосовой и дугообразный) одноименными полюсами и повторите эксперимент с разной скоростью движения катушки относительно магнитов. Запишите вывод.



4. Соберите установку, схематически изображенную на рисунке.

5. Проведите следующие опыты.

а) Поставьте ползунок реостата в положение, соответствующее минимальному сопротивлению. Замкните цепь ключом. Запишите, что вы наблюдали при замыкании цепи.

б) Разомкните цепь. Запишите, что вы наблюдали при размыкании цепи.

в) При замкнутой цепи изменяйте положение ползунка реостата и наблюдайте за показаниями миллиамперметра. Запишите, что вы наблюдали.

г) Какие явления, наблюдаемые в этом опыте, помогают понять принцип действия трансформатора? Запишите свой ответ.

6. Запишите выводы из эксперимента.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

Цель работы: определить показатель преломления стекла с помощью плоскопараллельной пластинки.

Оборудование: плоскопараллельная пластинка, булавки, линейка, транспортир.

Описание работы

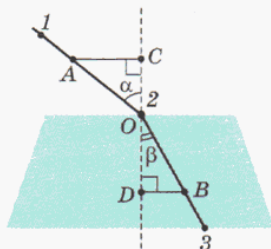
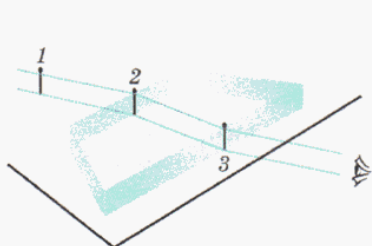
После прохождения через стеклянную плоскопараллельную пластинку луч света смещается, однако его направление остается прежним. Анализируя ход луча света, можно с помощью геометрических построений определить показатель преломления стекла

$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, где α и β — соответственно угол падения и угол преломления светового луча.

Ход работы

1. Положите на стол лист картона, а на него — стеклянную пластинку.

2. Воткните в картон по одну сторону пластинки две булавки — 1 и 2 так, чтобы булавка 2 касалась грани пластинки (см. рисунок). Они будут отмечать направление падающего луча.



3. Глядя сквозь пластинку, воткните третью булавку так, чтобы она закрывала первые две. При этом третья булавка тоже должна касаться пластины.

4. Уберите булавки, обведите пластину карандашом и в местах проколов листа картона булавками поставьте точки.

5. Начертите падающий луч 1—2, преломленный луч 2—3, а также перпендикуляр к границе пластинки (см. рисунок).

6. Отметьте на лучах точки A и B, для которых $OA = OB$. Из точек A и B опустите перпендикуляры AC и BD на перпендикуляр к границе пластинки (см. рисунок).

7. Измерив AC и BD, вычислите показатель преломления стекла, используя формулы:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}; \sin \alpha = \frac{AC}{OA}; \sin \beta = \frac{BD}{OB} = \frac{BD}{OA}; n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{AC}{BD}.$$

8. Повторите опыт и расчеты, изменив угол падения α .

9. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	AC, мм	BD, мм	n

10. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

5. НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Цель работы: экспериментально изучить явления интерференции и дифракции.

Оборудование: электрическая лампа с прямой нитью накала (одна на класс), две стеклянные пластинки, рамка из проволоки, стеклянная трубка, мыльная вода, компакт-диск, спиртовка, спички, лезвие безопасной бритвы, капроновая ткань черного цвета, пинцет, штангенциркуль.

Описание работы

Обычно интерференция наблюдается при наложении волн, испущенных одним и тем же источником, пришедших в данную точку разными путями.

Вследствие дифракции свет отклоняется от прямолинейного распространения (например, вблизи краев препятствий).

Ход работы

Опыт 1. Окуните проволочную рамку в мыльный раствор и внимательно рассмотрите образовавшуюся мыльную пленку. Зарисуйте в тетради для лабораторных работ увиденную вами интерференционную картину. Обратите внимание, что при освещении пленки белым светом (от окна или лампы) возникают окрашенные полосы.

С помощью стеклянной трубки выдуйте мыльный пузырь и внимательно рассмотрите его. При освещении его белым светом наблюдается образование цветных интерференционных колец. По мере уменьшения толщины пленки кольца, расширяясь, перемещаются вниз.

Запишите в тетради для лабораторных работ ответы на вопросы:

1. Почему мыльные пузыри имеют радужную окраску?
2. Какую форму имеют радужные полосы?
3. Почему окраска пузыря все время меняется?

Опыт 2. Тщательно протрите две стеклянные пластинки, сложите их вместе и сожмите пальцами. Из-за неидеальности формы соприкасающихся поверхностей между пластинками образуются тончайшие воздушные пустоты. При отражении света от поверхностей пластин, образующих зазор, возникают яркие радужные полосы — кольцеобразные или неправильной формы. При изменении силы, сжимающей пластинки, изменяются расположение и форма полос. Зарисуйте увиденные вами картинки в тетради для лабораторных работ.

Запишите в тетради для лабораторных работ ответы на вопросы:

1. Почему в местах соприкосновения пластин наблюдаются яркие радужные кольцеобразные или неправильной формы полосы?
2. Почему с изменением нажима изменяются форма и расположение интерференционных полос?

Опыт 3. Рассмотрите внимательно под разными углами поверхность компакт-диска (на которую производится запись). Что вы наблюдаете? Объясните наблюдаемые явления. Опишите интерференционную картину.

Опыт 4. Возьмите пинцетом лезвие безопасной бритвы и нагрейте его над пламенем спиртовки. Зарисуйте наблюдаемую картину в тетради для лабораторных работ.

Запишите в тетради для лабораторных работ ответы на вопросы:

1. Какое явление вы наблюдали?
2. Как его можно объяснить?

Опыт 5. Посмотрите сквозь черную капроновую ткань на нить горячей лампы. Поворачивая ткань вокруг оси, добейтесь четкой дифракционной картины в виде двух скрещенных под прямым углом дифракционных полос. Зарисуйте наблюдаемый дифракционный крест в тетради для лабораторных работ. Объясните наблюдаемые явления.

Запишите в тетради для лабораторных работ выводы.

Укажите, в каких из проделанных вами опытов наблюдалось явление интерференции, а в каких — явление дифракции.

6. НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

Цель работы: изучение сплошного спектра излучения твердых тел и линейчатого спектра газов; ознакомление с устройством и работой спектроскопа.

Оборудование: спектроскоп прямого зрения, плоскопараллельная пластина со скошенными гранями, лампочка на подставке,

набор спектральных трубок с водородом, гелием и неоном, прибор для зажигания спектральных трубок, экран со щелью.

Описание работы

Требуется изучить спектр света, излучаемого нагретым твердым телом (нитью накаливания электрической лампы) и сделать выводы о характере этого спектра. Затем следует изучить спектры излучения газов в атомарном состоянии и также сделать выводы о характере спектров.

Ход работы

1. Изучите устройство спектроскопа.
2. Укрепите спектроскоп в лапке штатива, расположив коллиматорную щель вертикально. Перед щелью на расстоянии нескольких сантиметров установите электрическую лампочку, чтобы нить накаливания была на высоте щели. Рассмотрите через окуляр сплошной спектр излучения нити лампы.
3. Возьмите в одну руку экран со щелью, а в другую — стеклянную пластину с косыми гранями. Экран расположите вертикально на фоне горящей лампы на расстоянии 30—40 см от глаза, а пластину — горизонтально перед глазом. Посмотрите через косые грани пластины на хорошо освещенную щель в экране. Слегка поворачивая пластину вокруг вертикальной оси, добейтесь наибольшей яркости видимого цветного изображения щели.
4. Зарисуйте наблюдаемый спектр. Укажите последовательность чередования цветов в сплошном спектре.
5. Включите спектральную трубку с водородом. Проведите наблюдение линейчатого спектра с помощью спектроскопа. Повторите наблюдение линейчатого спектра с помощью плоскопараллельной пластинки: через грани, образующие угол 60° и угол 45° . Зарисуйте наблюдаемый спектр. Запишите последовательность цветов видимых спектральных линий.
6. Повторите наблюдения линейчатых спектров согласно п. 5: а) для гелия; б) для неона.
7. Запишите в тетради для лабораторных работ: что вы наблюдали и какие сделали выводы.

7. ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ФОТОГРАФИЯМ

Цель работы: определить тип заряженной частицы по результатам сравнения ее трека с треком протона в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Оборудование: фотографии треков заряженных частиц, лист кальки, угольник, линейка, карандаш.

Описание работы

Работа проводится с фотографией треков двух заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, — протона и частицы, тип которой надо определить.

Линии индукции магнитного поля перпендикулярны плоскости фотографии.

Начальные скорости частиц равны и перпендикулярны краю фотографии.

Тип частицы определяется сравнением ее удельного заряда $\frac{q}{m}$ с удельным зарядом протона.

Под действием силы Лоренца заряженная частица движется в магнитном поле по окружности радиусом R_1 . При движении в магнитном поле $qvB = \frac{mv^2}{R_1}$, откуда получаем $\frac{q}{m} = \frac{v}{BR_1}$.

Для протона аналогично $\frac{e}{m_p} = \frac{v}{BR_2}$.

Отсюда следует, что отношение удельных зарядов обратно пропорционально отношению радиусов траекторий протона и не-

известной частицы: $\frac{\frac{q}{m}}{\frac{e}{m_p}} = \frac{R_2}{R_1}$.

Для измерения радиуса кривизны трека вычерчивают две различные хорды и восстанавливают к ним перпендикуляры из центров хорд.

Центр окружности лежит на пересечении этих перпендикуляров. Радиус окружности измеряют линейкой.

Ход работы

1. Ознакомьтесь с фотографией треков двух заряженных частиц — ядер легких элементов (см. рисунок). Трек *I* принадлежит протону, трек *II* — частице, тип которой надо определить.

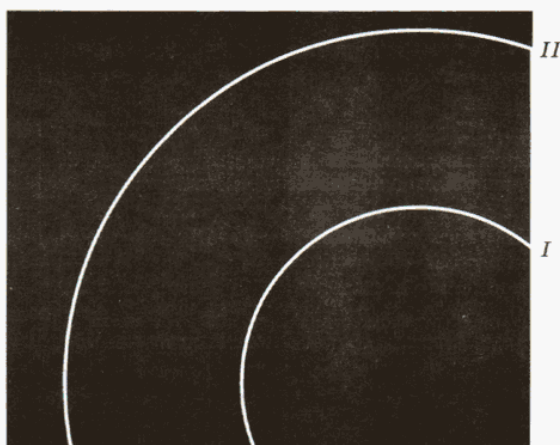
2. Определите знак электрического заряда неизвестной частицы на фотографии.

3. Перенесите на кальку треки частиц с фотографии и с помощью описанного выше геометрического построения найдите радиусы траекторий неизвестной частицы и протона.

4. Сравните удельные заряды неизвестной частицы и протона.

5. Определите тип неизвестной частицы.

6. Результаты измерений и вычислений, а также сделанный вами вывод о типе неизвестной частицы запишите в тетрадь для лабораторных работ.



8. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Цель работы: экспериментально проверить закон радиоактивного распада.

Оборудование: 128 монет (для упрощения вычислений число монет берется равным степени числа 2), банка, лоток.

Описание работы

За промежуток времени, равный периоду полураспада T , каждое из радиоактивных ядер распадается с вероятностью $\frac{1}{2}$. Процесс радиоактивного распада можно моделировать подбрасыванием монеты, при котором с одинаковой вероятностью $\frac{1}{2}$ выпадают «орел» или «решка». Примем, что если выпадает «орел», то ядро не распалось, если же «решка», то распалось. Каждое бросание монеты соответствует протеканию промежутка времени, равного периоду полураспада.

Ход работы

1. Отсчитайте начальное количество монет $N_0 = 128$, перемешайте их в банке и высыпьте в лоток.

2. Подсчитайте число «нераспавшихся ядер» (то есть монет, которые легли «орлом» вверх), соберите их в банку, снова перемешайте и высыпьте в лоток.

3. Опыт повторите 10 раз.

4. Заполните таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

Количество бросаний,	Количество нераспавшихся ядер, N	Количество распавшихся ядер, $N' = N - N_0$
$n = \frac{t}{T}$		

5. Повторите серию бросаний монет еще дважды, начиная каждый раз с $N_0 = 128$.

6. Подобрав удобный масштаб, постройте в тетради для лабораторных работ график зависимости $N(t)$, соответствующий формуле $N = N_0 \cdot 2^{-n}$. Удобнее чертить графики для разных серий карандашами разных цветов.

7. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измерили и какой получен результат.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адроны 194

Аккомодация 106

Ампер А. М. 39

Ампер — единица силы тока 7, 39

Аннигиляция 194

Античастица 193

Астероиды 222

Астрономическая единица 205

Атомное ядро 143, 168

Атомные спектры 148

Барионы 195

Басов Н. Г. 156

Беккерель А. 173

Белые карлики 232, 237

Близорукость 107

Большой взрыв 250

Бор Н. 145, 162

Браге Т. 234

Венера 216

Взаимодействия фундаменталь-
ные 196

Вихревое электрическое поле 59

Волна плоская 118

— сферическая 117

Волновая теория света 93

Вольта А. 6

Галактики 245

Галилей Г. 100, 222

Гамов Дж. 251

Гейзенберг В. 163, 170

Гелл-Манн М. 195

Гельмгольц Г. 210

Генератор электрического тока 68
— электромагнитных колебаний
82

Герц Г. 76, 94, 135

Гершель У. 243

Гилберт У. 37

Главная оптическая ось 101

Глюоны 197

Голубые гиганты 231

Гук Р. 100

Гюйгенс Х. 93

Дальнозоркость 107

Де Бройль Л. 159

Дефект масс 182

Джоуль П. 23

Дисперсия света 121

Дифракция света 117

Закон Джоуля — Ленца 22

— Ома для участка цепи 12

— — для полной цепи 29

— прямолинейного распростра-
нения света 95

— радиоактивного распада 176

— Хаббла 249

— электромагнитной индукции
60

Законы отражения 95

— преломления 96

— фотоэффекта 136

Зарядовое число 170

Земля 202, 217

Иваненко Д. Д. 170

Изображение действительное 103

— мнимое 103

Изотопы 169

Индуктивность 64

Индукционный ток 57

Интерференция света 114

Инфракрасное излучение 126

Ионизирующее излучение 191

Ионосфера 84

Источник тока 27

Каммерлинг-Оннес Г. 15

Кант И. 223

Квазары 246

Квантовая механика 159, 160

Квантовые генераторы 156

Кварки 195, 196

Кеплер И. 204

Кирхгоф Г. 149

Колебательный контур 82

Кометы 223

Короткое замыкание 30

Корпускулярная теория света 93

Корпускулярно-волновой дуализм 159

Красное смещение 248

Красные гиганты 231, 236

— карлики 231

Критическая масса 188

Курчатов И. В. 187

Кюри П. 173

Лазер 153

Ландау Л. Д. 238

Лебедев П. Н. 78

Ленц Э. Х. 23

Лептоны 195, 196

Линейчатые спектры 148

Линзы 100

Линии магнитной индукции 49

Лодыгин А. Н. 9

Лоренц Х. 47

Луна 203, 218

Магнитная индукция 44

Магнитное действие тока 9

Магнитный поток 56

Максвелл Дж. К. 74, 222

Маркони Г. 80, 84

Марс 219

Массовое число 171

Мезоны 195

Мейтнер Л. 184

Меркурий 215

Метастабильные состояния 154

Метод параллакса 204, 228

Микроскоп 110

Млечный Путь 242

Модель атома Томсона 141

— Фридмана 250

— «горячей Вселенной» 251

Модуляция 81, 83

Мощность тока 25

Нейтрино 195

Нейтрон 169

Нейтронные звезды 238

Ньютон И. 93, 115, 203

Объектив 108

Ом Г. 11

Ом — единица сопротивления 12

Оптическая сила линзы 102

Опыт Герца 75

— Лебедева 78

— Резерфорда 142, 175

— Эрстеда 38

— Юнга 113

Отражение диффузное 96

— зеркальное 95

Параллакс 204

Период полураспада 176

Периодическая система химических элементов 170

Петров В. В. 9

Планетарная модель атома 144

Планеты земной группы 207, 215

Планеты-гиганты 207, 220

Планк М. 133, 134

Поглотители нейтронов 188

Поглощенная доза излучения 191

Позитрон 193

Показатель преломления 97

Поле магнитное 43

Попов А. С. 80

Постоянная Планка 133, 163

— Хаббла 249

Постоянный ток 7

Постулаты Бора 146

Правило левой руки 47

— Ленца 62

— смещения 175

Принцип Гюйгенса 118

Принципы радиосвязи 81

Проникающая способность 169

Протон 168

Протонно-нейтронная модель ядра 170

Протуберанцы 213

Прохоров А. М. 156

Работа тока 22

Равновесное излучение 132

Радий 173

Радиоактивность 173

Радиоактивные превращения 175

Радуга 123

Расстояние наилучшего зрения 106

Расширение Вселенной 249

Реакции деления 184

— синтеза 183

Резерфорд Э. 141, 143, 168, 179
Реликтовое излучение 251
Рёмер О. 92

Сатурн 222
Сахаров А. Д. 191
Сверхновая 238
Световой год 206
Сила Ампера 45
— Лоренца 47
— тока 7, 29
Склодовская-Кюри М. 173
Скорость света 77
Соединение параллельное 18, 24
— последовательное 17, 23
Солнечная система 205
Солнце 207, 209
Соотношение неопределенностей 163
Спектр 121
Спектральный анализ 150
Спектры излучения 148
— поглощения 149
Стационарные орбиты 146
Столетов А. Г. 137
Сторонние силы 27
Строение глаза 106
Струве В. Я. 228

Таблица Менделеева 170
Тамм И. Е. 191
Таунс Ч. 156
Телевидение 139
Телескоп 111
Теория Максвелла 74
— относительности общая 240
— относительности специаль-
ная 77, 181
Тепловое действие тока 9
— излучение 126
Термоядерный синтез 70, 210
Томсон Дж. Дж. 141
Трансформатор 72

Удельная энергия связи 182
Удельное сопротивление 12
Ультрафиолетовое излучение 126
Управляемая цепная ядерная ре-
акция 187

Управляемый термоядерный син-
тез 190
Уравнение Эйнштейна 138

Фарадей М. 9, 54
Ферми Э. 180, 186
Флеров Г. Н. 185
Фокусное расстояние линзы 102
Формула Томсона 83
Фотоаппарат 108
Фотоны 134
Фотоэлементы 139
Фотоэффект 135
Френель О. 117
Фридман А. А. 250, 251
Фронт волны 117
Фундаментальные частицы 196

Хаббл Э. 251
Химическое действие тока 8
Хрусталик 106

Цвет 121
Цепные реакции деления 186

Шмидт О. Ю. 223
Штрассман Ф. 184

ЭДС индукции 60
— источника тока 29
Эйнштейн А. 77, 134, 138, 154,
181, 253
Электромагнитная индукция 54,
57
Электромагнитное поле 75
Электромагнитные волны 75, 77
Электрон 141, 163
Электрон-вольт 151
Электростанция атомная 189
Энергетические уровни 151
Энергия магнитного поля 65
— связи 181, 182
Эрстед Х. 38

Юнг Т. 124
Юпитер 221

Яблочков П. Н. 9
Ядерные реакции 179
— силы 171
Ядерный реактор 186

ОГЛАВЛЕНИЕ

К учителю и ученику	3
Предисловие	4
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	
Глава 1. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	5
§ 1. Электрический ток	6
1. Источники постоянного тока	6
2. Сила тока	7
3. Действия электрического тока	8
§ 2. Закон Ома для участка цепи	11
1. Сопротивление и закон Ома для участка цепи	11
2. Природа электрического сопротивления	13
3. Сверхпроводимость	15
§ 3. Последовательное и параллельное соединение проводников	17
1. Последовательное соединение	17
2. Параллельное соединение	18
3. Измерения силы тока и напряжения	20
§ 4. Работа и мощность постоянного тока	22
1. Работа тока и закон Джоуля—Ленца	22
2. Мощность тока	25
§ 5. Закон Ома для полной цепи	27
1. Источник тока	27
2. Закон Ома для полной цепи	29
3. Передача энергии в электрической цепи	31
Глава 2. МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	35
§ 6. Взаимодействие магнитов и токов	36
1. Взаимодействие магнитов	36
2. Взаимодействие проводников с токами и магнитов	38
3. Взаимодействие проводников с токами	39
4. Связь между электрическим и магнитным взаимодействиями	40
§ 7. Магнитное поле	43
1. Магнитное поле	43
2. Магнитная индукция	44
3. Сила Ампера и сила Лоренца	45
4. Линии магнитной индукции	48
Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	53
§ 8. Электромагнитная индукция	54
1. Явление электромагнитной индукции	54
2. Закон электромагнитной индукции	59

§ 9. Правило Ленца. Индуктивность. Энергия магнитного поля	61
1. Правило Ленца	61
2. Явление самоиндукции	63
3. Энергия магнитного поля	65
§ 10. Производство, передача и потребление электроэнергии	67
1. Производство электроэнергии	67
2. Передача и потребление электроэнергии	71
§ 11. Электромагнитные волны	74
1. Теория Максвелла	74
2. Электромагнитные волны	75
§ 12. Передача информации с помощью электромагнитных волн	80
1. Изобретение радио и принципы радиосвязи	80
2. Генерирование и излучение радиоволн	82
3. Передача и прием радиоволн	84
Глава 4. ОПТИКА	91
§ 13. Природа света. Законы геометрической оптики	92
1. Развитие представлений о природе света	92
2. Прямолинейное распространение света	95
3. Отражение света	95
4. Преломление света	96
§ 14. Линзы	100
1. От стеклянного шара до микроскопа	100
2. Виды линз и основные элементы линзы	101
3. Построение изображений в линзах	102
§ 15. Глаз и оптические приборы	106
1. Глаз	106
2. Оптические приборы	108
§ 16. Световые волны	113
1. Интерференция света	113
2. Дифракция света	116
3. Соотношение между волновой и геометрической оптикой	117
§ 17. Цвет	121
1. Дисперсия света	121
2. Как глаз различает цвета	122
3. Окраска предметов	123
4. Невидимые лучи	126

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

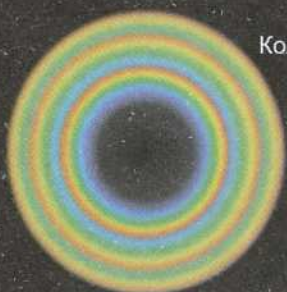
Глава 5. КВАНТЫ И АТОМЫ	131
§ 18. Кванты света — фотоны	132
1. Равновесное тепловое излучение	132
2. «Ультрафиолетовая катастрофа»	133
3. Гипотеза Планка	133

§ 19. Фотоэффект	135
1. Законы фотоэффекта	135
2. Теория фотоэффекта	138
3. Применение фотоэффекта	139
§ 20. Строение атома	141
1. Опыт Резерфорда	141
2. Планетарная модель атома	144
3. Постулаты Бора	145
§ 21. Атомные спектры	148
1. Спектры излучения и поглощения	148
2. Энергетические уровни	150
§ 22. Лазеры	153
1. Применение лазеров	153
2. Спонтанное и вынужденное излучение	154
3. Принцип действия лазера	156
§ 23. Квантовая механика	159
1. Корпускулярно-волновой дуализм	159
2. Вероятностный характер атомных процессов	160
3. Соответствие между классической и квантовой механикой	162
Глава 6. АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ	167
§ 24. Атомное ядро	168
1. Строение атомного ядра	168
2. Ядерные силы	171
§ 25. Радиоактивность	173
1. Открытие радиоактивности	173
2. Радиоактивные превращения	175
§ 26. Ядерные реакции и энергия связи ядер	179
1. Ядерные реакции	179
2. Энергия связи атомных ядер	180
3. Реакции синтеза и деления ядер	182
§ 27. Ядерная энергетика	186
1. Ядерный реактор	186
2. Перспективы и проблемы ядерной энергетики	189
3. Влияние радиации на живые организмы	191
§ 28. Мир элементарных частиц	193
1. Открытие новых частиц	193
2. Классификация элементарных частиц	194
3. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия	196

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Глава 7. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА	201
§ 29. Размеры Солнечной системы	202
1. Земля и Луна	202
2. Орбиты планет	204
3. Размеры Солнца и планет	207
§ 30. Солнце	209
1. Источник энергии Солнца	209
2. Строение Солнца	212
§ 31. Природа тел Солнечной системы	215
1. Планеты земной группы	215
2. Планеты-гиганты	220
3. Малые тела Солнечной системы	222
4. Происхождение Солнечной системы	223
Глава 8. ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, ВСЕЛЕННАЯ	227
§ 32. Разнообразие звезд	228
1. Расстояния до звезд	228
2. Светимость и температура звезд	230
§ 33. Судьбы звезд	234
1. «Звезда-гостя» и «звезда Тихо Браге»	234
2. От газового облака до белого карлика	235
3. Эволюция звезд разной массы	237
§ 34. Галактики	242
1. Наша Галактика — Млечный Путь	242
2. Другие галактики	244
§ 35. Происхождение и эволюция Вселенной	248
1. Расширение Вселенной	248
2. Большой Взрыв	250
3. Будущее Вселенной	252
Лабораторные работы	255
Предметно-именной указатель	266

• Интерференционные полосы в опыте Юнга



Кольца Ньютона



Смещение цветов
на экране телевизора



Разложение белого света в спектр



Преломление
и отражение света
в капле воды



Образование радуги

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Частота ν , Гц

10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 10^{10} 10^{11} 10^{12}

низкочастотные
колебания

радиоволны

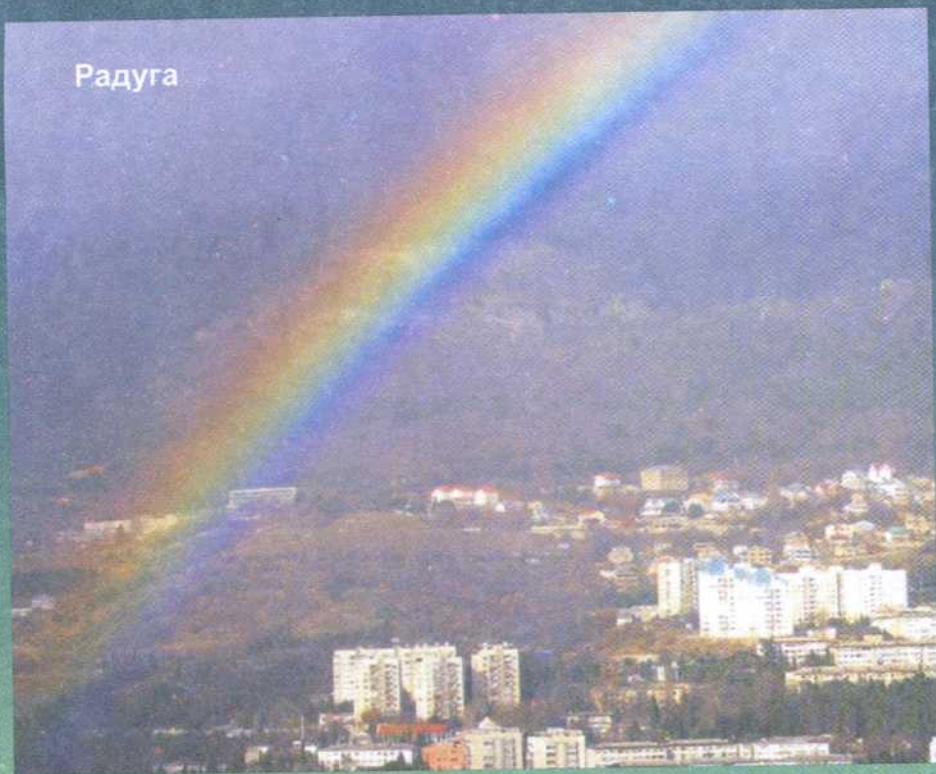
СВЧ-излучение

инфр

Длина волны λ , м

10^5 10^4 10^3 10^2 10 1 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3}

Радуга



Спектры излучения

натрия



водорода



Спектры поглощения

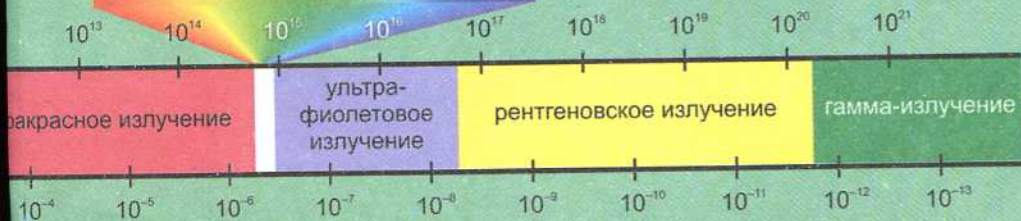
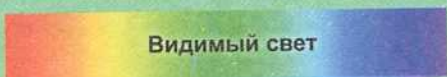
солнечный

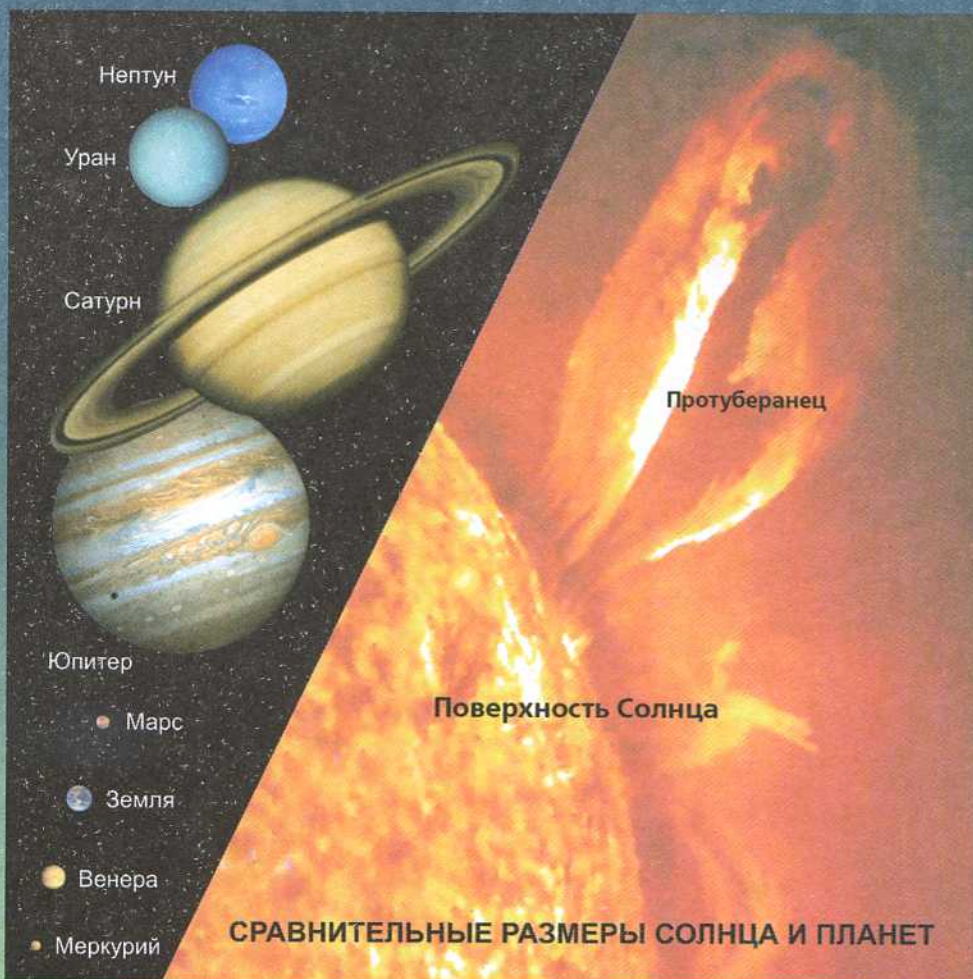


водорода



Видимый свет





Крабовидная туманность



Галактика Андромеды

